

17º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental

PROJETO GEOTÉCNICO DE TALUDES DE CAVA EM DEPÓSITO SAPROLÍTICO DE NÍQUEL

Felipe Vilela ¹; Rafael Ribeiro ²; Lucas Figueiredo ³; Jhoan Panitz ⁴ José Matheus Araújo⁵

Resumo – Muitos são os problemas geotécnicos quando taludes da mina são conformados por materiais saprolíticos. Isso ocorre devido aos baixos parâmetros geotécnicos desses materiais e faz com que exista grandes preocupações quanto a estabilidade dos taludes. Nesse estudo foi confeccionado um modelo geológico-geotécnico 3D, as análises indicaram dois mecanismos de rupturas principais atuantes, e assim foram sugeridos setores geotécnicos e diretrizes geométricas para os taludes da cava.

Abstract – There are many geotechnical problems when open pit slopes are conformed by saprolithic materials. They occur due to the low geotechnical parameters of these materials and cause huge concerns about the slope stability. In this study, a 3D geological-geotechnical model was developed, the analyses indicated two main failure mechanisms, and thus geotechnical sectors and geometric guideline for the open pit slopes were proposed.

Palavras-Chave – Projeto Geotécnico; depósito saprolítico; modelo geológico-geotécnico;

¹ Geól., Universidade Federal do Espírito Santo: Alegre - ES, felipevilelago@gmail.com
EMPRESA: Anglo American, Belo Horizonte – MG, (31) 99871-0434, felipe.vilela@angloamerican.com.br

² Geól., Universidade Estadual Paulista: Rio Claro - SP, rafaelvieira.br@hotmail.com
EMPRESA: TEC3 Engenharia e Recursos Hídricos, Belo Horizonte - MG (31) 983952443, rribeiro@tec3engenharia.com.br

³ Eng. Geól., Msc. Universidade Federal de Ouro Preto: Ouro Preto - MG, torrent.figueiredo@gmail.com
EMPRESA: Anglo American, Belo Horizonte – MG, (31) 98402-2195, lucas.t.figueiredo@angloamerican.com

⁴ Geól., Msc. Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa - PE, jparedespanitz@gmail.com
EMPRESA: TEC3 Engenharia e Recursos Hídricos, Belo Horizonte - MG (31) 984997535, jpanitz@tec3engenharia.com.br

⁵ Eng. Geól., Universidade Federal de Ouro Preto: Ouro Preto - MG,
EMPRESA: Anglo American, Barro Alto – GO, (62) 98333-5857, jose.araujo@angloamerican.com

1. INTRODUÇÃO

A avaliação da estabilidade de taludes em cavas é muito dificultada quando as informações geotécnicas são limitadas. Esse desafio é muito comum em minas, onde praticamente só a geoquímica é utilizada como fonte de conhecimento. Para o estudo foram realizadas análises e consolidação das informações históricas existentes, mapeamento geológico-geotécnico, descrição geomecânica de testemunhos, execução de campanha de ensaios de laboratório, elaboração de modelo geológico-geotécnico 3D, desenvolvimento de análises de estabilidade e retroanálises com base em modos de falha atuantes na cava. A mina de Barro Alto, um depósito de níquel laterítico no centro-oeste do Brasil, proporcionou um estudo de caso.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

2.1. Caracterização Geológica Regional

A mina está localizada no contexto da Província Tocantins, a qual foi inicialmente definida por Almeida et al. (1981). Esta província encontra-se na região central do Brasil e compreende uma importante zona orogênica alocada entre os crátons do São Francisco e Amazônico (Figura 1). Formada durante o Ciclo Brasiliano, nela estão localizados os Complexos Máfico-Ultramáficos da região central do Brasil, incluindo o Complexo Barro Alto (Pimentel et al., 2000).

Conforme os dados geocronológicos, no complexo existem duas associações máfico-ultramáficas que correspondem a dois eventos magmáticos. O primeiro de idade Mesoproterozoica (1.25 Ga) relacionado ao complexo acamadado Serra da Malacacheta/Série Acamadada Superior (Ferreira Filho, 1998), e um segundo de idade Neoproterozoica (0.79 Ga) relacionado a Zona Máfica Inferior e Zona Ultramáfica do Complexo (Correia et al., 1999). As principais litologias presentes nas zonas supracitadas são, segundo Ferreira Filho (1998; 2010):

- Zona Máfica Inferior: websteritos e olivina websteritos, gabronoritos e noritos;
- Zona Ultramáfica: dunitos e harzburgitos serpentinizados. Nesta está presente a mineralização em níquel atualmente explorada pela Anglo American;
- Série Acamadada Superior: rochas anortosíticas (anortositos e leuco-troctolitos); gabróicas e eventual intercalação de piroxenitos.

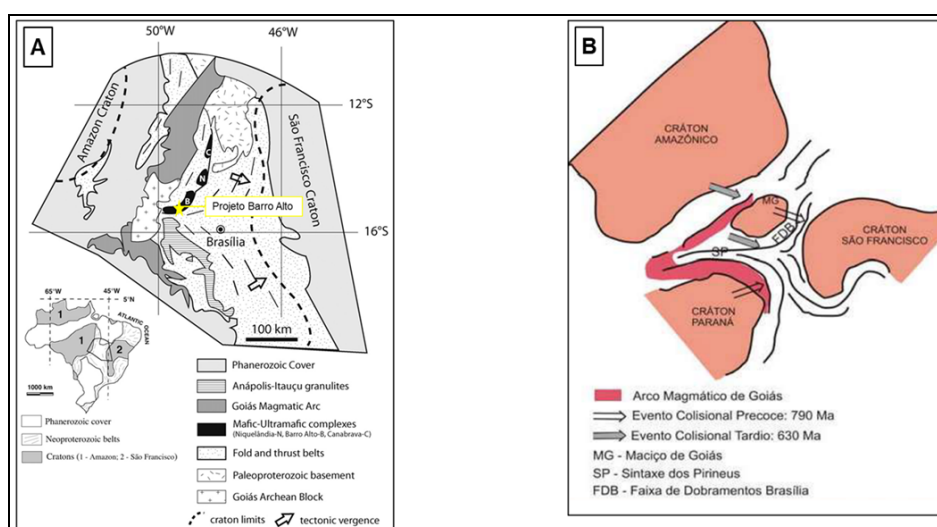


Figura 1. A) Província Tocantins localizada na região central do Brasil, evidenciando os complexos máfico-ultramáficos de Niquelândia (N), Barro Alto (B) e Canabrava (C). Fonte: Extraído e modificado de Ferreira Filho et al. (2010). B) Evolução da Faixa Brasília e sucessivas fases compressionais. Fonte: Extraído de Pimentel et al. (2000).

2.2. Caracterização Geomecânica Local

Foram observadas na área da cava litotipos e perfis de intemperismo pertencentes tanto a Zona Ultramáfica (dunitos serpentinizados) quanto da Série Acamadada Superior (rochas anortosíticas). Os litotipos foram subdivididos em Unidades Lito-Geomecânicas, pelas características geológico-geotécnicas obtidas durante a etapa de mapeamento e descrição de sondagens geotécnicas. A Tabela 1 abaixo apresenta as Unidades e os critérios utilizados para a separação são conforme a ISRM⁶ (1981).

Tabela 1. Principais unidades lito-geomecânicas identificadas em mapeamento das áreas 1 e 2.

Unidade Lito-Geomecânica	ID	Classe de Maciço*	Resistência (R)	Resistência a Compressão Uniaxial (MPa)	Grau de Intemperismo (W)
Colúvio	COL	-	-	-	-
Calcedônia Hard	CH	-	R5	100 - 250	-
Calcedônia Soft	CS	-	R2	5 - 25	-
Solo Residual de Dunito	SRD	-	-	-	W6
Saprolito de Dunito - Estéril	SPE	V	R0/R1	0,25 - 5	W5
Saprolito de Dunito - Minério	SPM	V	R0	0,25 - 1	W5
Boulder de Dunito	BLD	IV	R2	5 - 25	W3/W4
Rocha Sã (Fresca) de Dunito	DN III	III	R3/R4	25 - 100	W1/W2
Rocha Sã (Fresca) de Dunito	DN I/II	I-II	R5/R6	100 - > 250	W1
Solo Residual de Anortosito	SRA	-	-	-	W6
Saprolito de Anortosito	SPA	V	R0/R1	0,25 - 5	W5
Boulder de Anortosito	BLA	IV	R2	5 - 25	W3/W4
Rocha Sã (Fresca) de Anortosito	AN III	III	R3/R4	25 - 100	W1/W2
Rocha Sã (Fresca) de Anortosito	AN I/II	I-II	R5/R6	100 - > 250	W1

*Segundo Bieniawski (1989)

Apesar da quantidade de Unidades Lito-Geomecânicas presentes na cava, as mais representativas são o Saprolito de Dunito - Estéril (SPE), Saprolito de Dunito - Minério (SPM) e Saprolito de Anortosito (SPA) (Figura 2). Ademais, destaca-se que SPM representa o material de menor competência dentre os materiais estudados, de modo que quando exposto em taludes este encontra-se, usualmente, com processos erosivos instalados e, por vezes, controlando os mecanismos de falha.

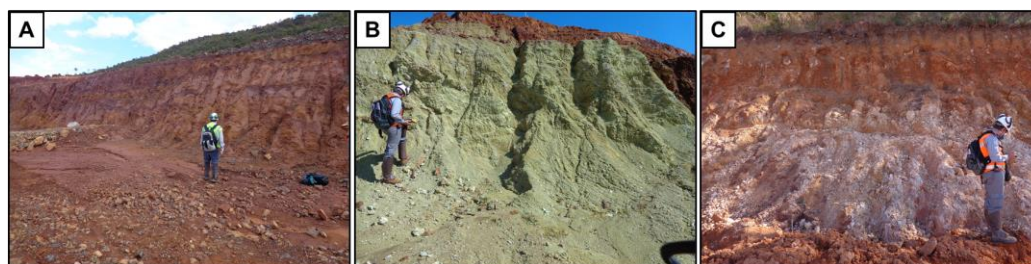


Figura 2. Unidades Lito-Geomecânicas aflorantes na cava, evidenciando em: A) Saprolito de Dunito - Estéril (SPE); B) Saprolito de Dunito - Minério (SPM); e C) Saprolito de Anortosito (SPA).

⁶ International Society for Rock Mechanics (1981)

2.3. Mecanismos de Ruptura

Durante o estudo, foram identificados na cava de Barro Alto que as rupturas de maiores proporções são caracterizadas como rupturas circulares e/ou plano-circulares. No contexto e histórico da mina, entende-se que rupturas podem ser desencadeadas em duas condições principais:

- 1: Presença de camada de menor resistência com extensão considerável em subsuperfície (ex.: camada de SPM);
- 2: Condicionada pelo contato tectônico entre a Zona Ultramáfica e a Série Acamadada Superior.

A Figura 3 apresenta exemplos esquemáticos das condições apresentadas acima. Destaca-se que ambas as situações são potencializadas em condições do nível freático elevado, conforme apresentado nas análises de estabilidade.

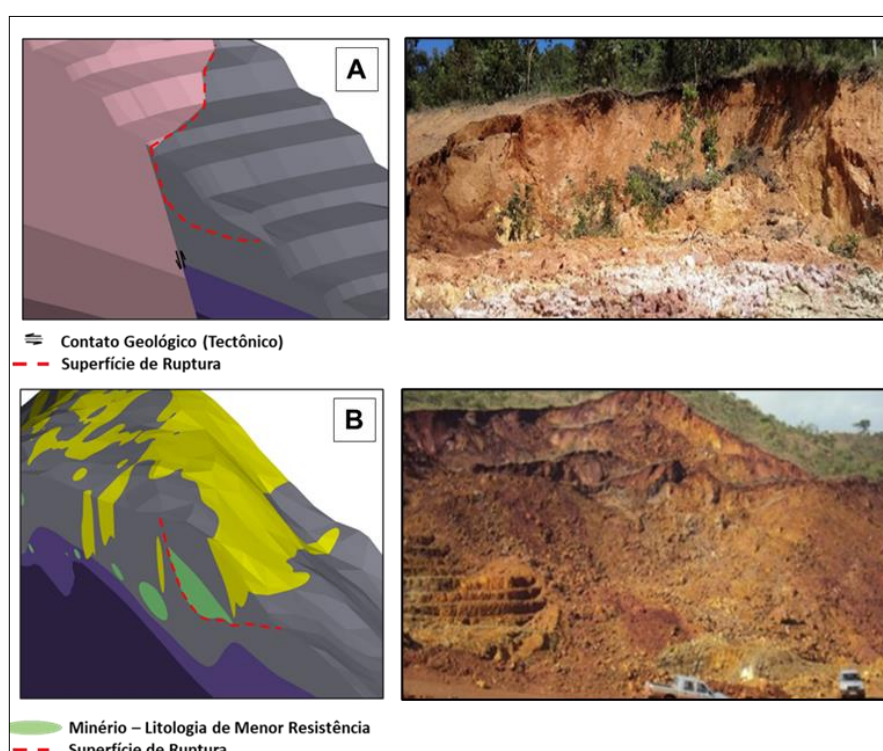


Figura 3. Estruturas condicionantes de rupturas circulares e plano circulares na cava de Barro Alto, evidenciando em: A) ruptura condicionada por superfície de falha; e B) ruptura condicionada por camada de minério em subsuperfície.

2.4. Parametrização Geotécnica

Os critérios de resistência dos materiais foram determinados através da análise dos dados existentes e dos resultados obtidos na campanha de ensaios triaxiais executadas no ano 2021. Esses resultados foram posteriormente submetidos à retroanálises para validação, de forma que representassem da melhor maneira as condições observadas em campo. Foi utilizado o critério de resistência de Mohr-Coulomb e os parâmetros empregados nas análises são indicados na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2. Parâmetros de Resistência das Unidades Lito-Geomecânicas.

Unidade Lito-geomecânica	Parâmetros		
	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)
SRD	17	33	22

SPA	19	17	23
SPM	17	20	20
SPE	18	26	31
CS	17	25	29
CH	24	60	36
COL	16	12	19
BLD	24	100	32
DN	27	150	35
BLA	24	150	40
AN	27	200	42

2.5. Modelo Geológico-Geotécnico

Foi desenvolvido um modelo geológico-geotécnico de áreas específicas da Cava de Barro Alto, que tiveram como critério de escolha as regiões com maiores criticidades geotécnicas (maiores taludes e presença de rupturas de grande porte). Como critério construtivo, foram utilizados dados obtidos de mapeamento geomecânico, descrição de testemunhos de sondagem geotécnica, bem como dados de sondagens rotopercussiva em circulação reversa (RC).

Neste contexto, a confecção do modelo geológico-geotécnico foi realizada com o uso do *software* LeapFrog Geo (Seequent). A elaboração do modelo foi baseada na geração de grandes contatos litológicos, utilizados como limites na interpolação, para posterior subdivisão em unidades lito-geomecânicas. A Figura 4 abaixo ilustra o modelo geológico-geotécnico implícito, com a escavação final planejada, além das principais direções de interpolação conforme dados obtidos em etapa de mapeamento.

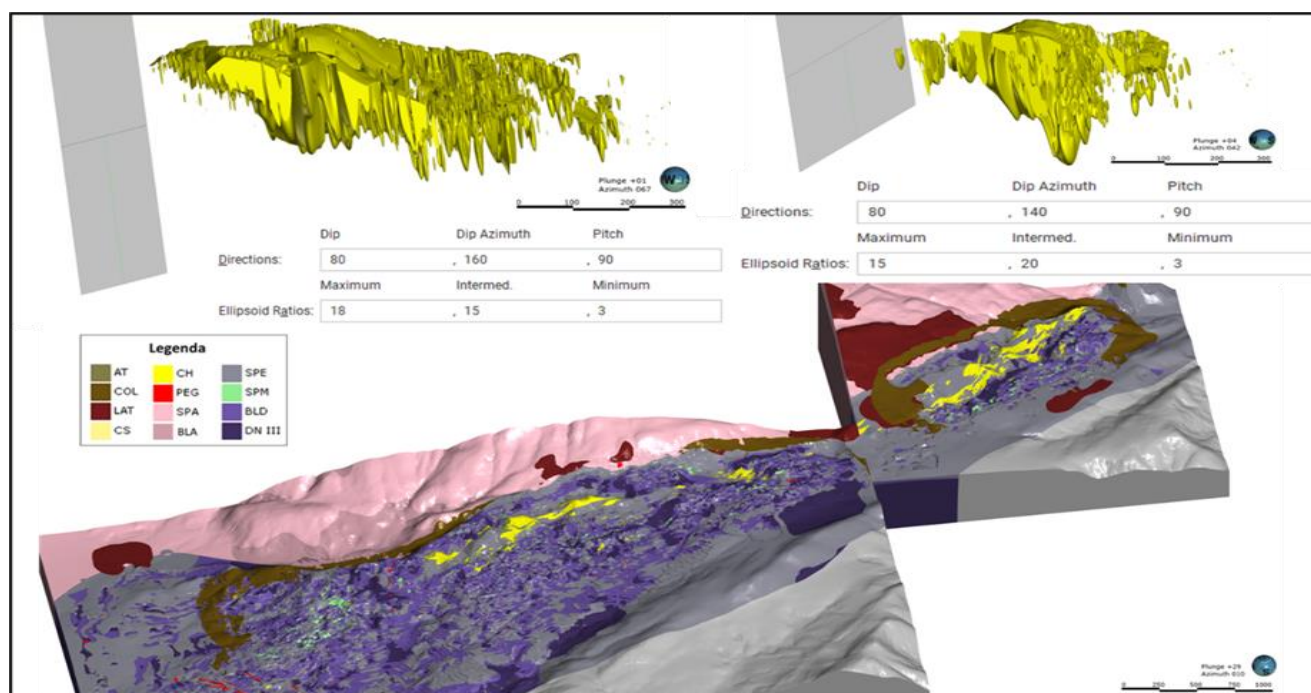


Figura 4. Modelo geológico-geotécnico implícito, evidenciando as principais direções de interpolação.

3. ANÁLISES DE ESTABILIDADE

As análises de estabilidade tiveram como objetivo determinar os fatores de segurança (FS) mínimos para os taludes da cava final das áreas críticas da Mina de Barro Alto, de modo a considerar os diferentes tipos de materiais, mecanismos de ruptura, e condições geométricas.

Para isso, foram realizadas com o auxílio do *software* Slide 2 (Rocscience®), análises por equilíbrio limite para diferentes alturas e ângulos de talude pelos métodos Bishop Simplificado, Spencer e Morgenstern-Price. Além disso, foram realizadas com o uso do método de otimização global não circular *Cuckoo Search*, o qual se utiliza de testes em todas as regiões possíveis do espaço de pesquisa, de modo a não ficar preso em mínimos locais, mas sim buscar o mínimo global da seção analisada (Rocscience, 2016). Para o estudo de caso, foram analisados dois taludes onde rupturas condicionadas pela pelos mecanismos conhecidos ocorreram em regiões específicas da cava (Figura 5).

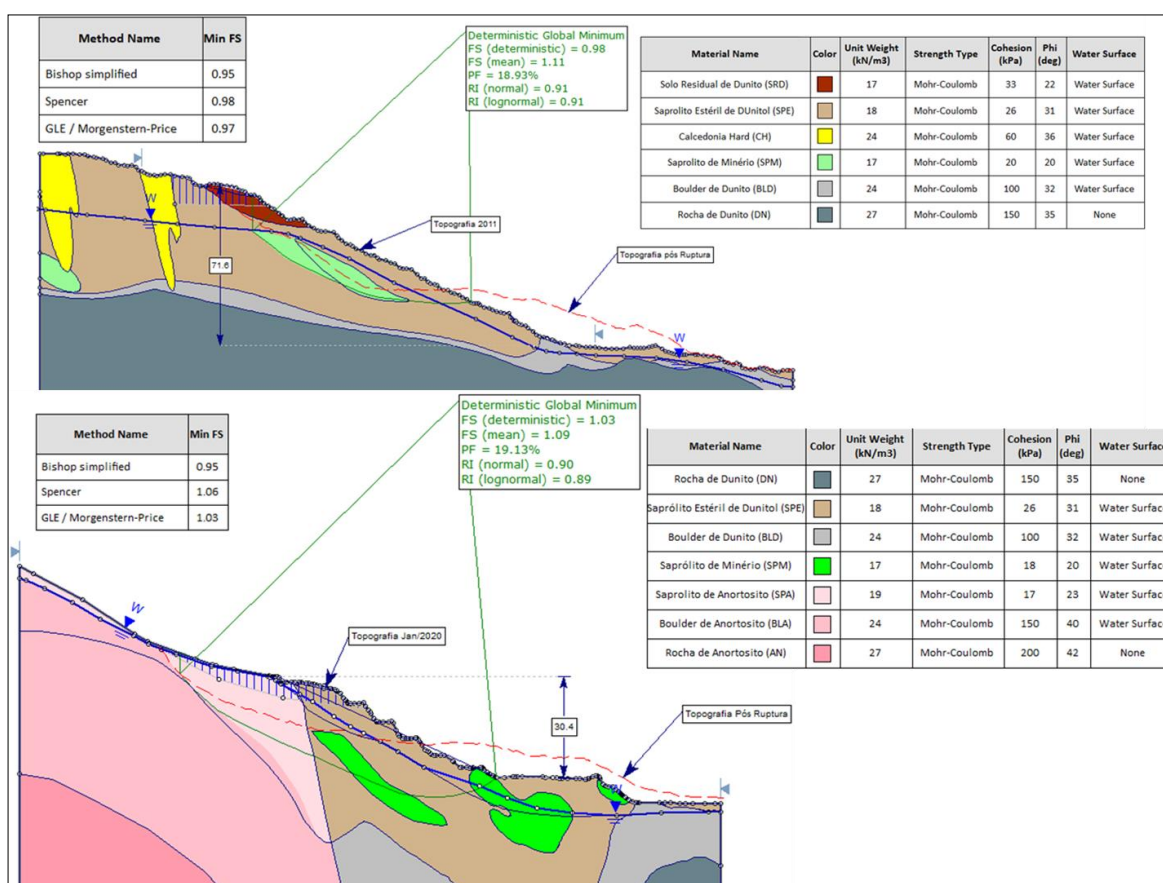


Figura 5. Retroanálises de seções críticas analisadas, evidenciando acima uma ruptura ocorrida pela existência de material menos resistente (SPM) e abaixo ruptura ocorrida pelo contato tectônico entre SPA e SPE.

Portanto verificou-se a necessidade de adequação do projeto geométrico existente para que ficasse dentro do critério de aceitabilidade para os casos evidenciados.

4. PROJETO GEOMETRICO DE TALUDES

O fluxograma apresentado na Figura 6 representa a sistemática utilizada para o dimensionamento dos taludes da cava, seguido o recomendado por Martin (2018). Quanto aos critérios de aceitação para as geometrias, a Cava de Barro Alto segue o padrão global "Slope

Stability and Optimization Guideline (AA TS 401 003 – Anglo American, documento interno), sendo considerado aceitável um FS entre rampas e global superior a 1,30, e a nível de bancada considera-se aceitável valores de FS superiores a 1,10.

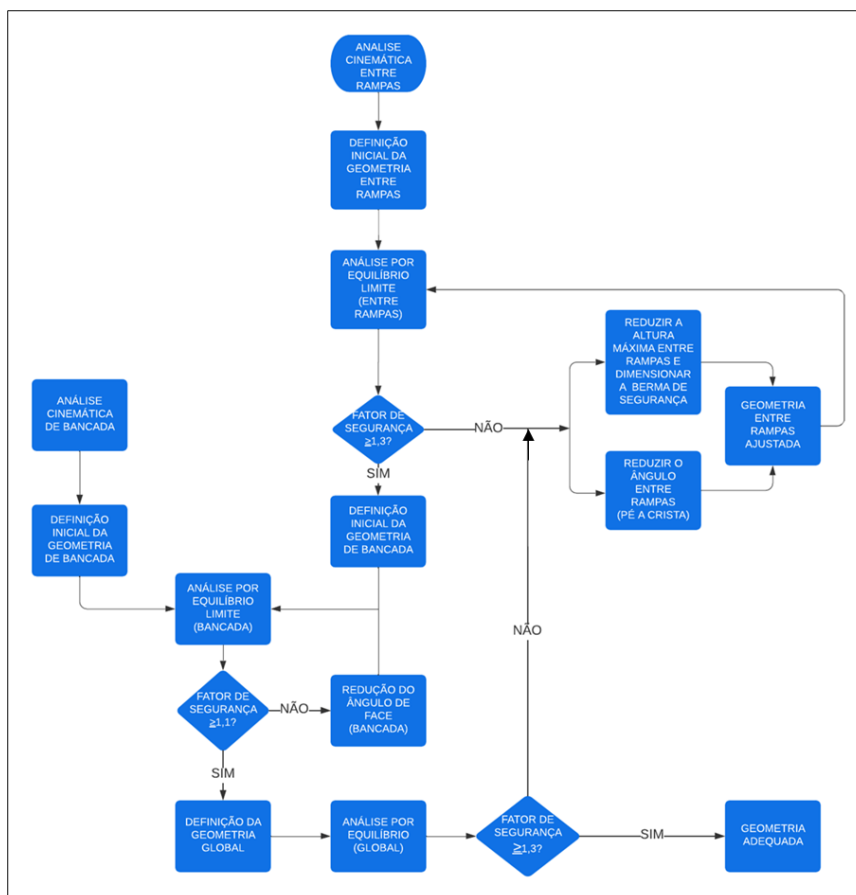


Figura 6. Fluxograma dos procedimentos utilizado para as análises de estabilidade dos taludes das cavas

Neste contexto, após as análises de estabilidade em seções críticas, foi realizado uma setorização geotécnica composta pelo Setor A e Setor Padrão, que seguem como critério a existência dos principais mecanismos de ruptura existentes na cava (item 2.3). A Figura 7 abaixo exemplifica a separação dos Setores Geotécnicos.

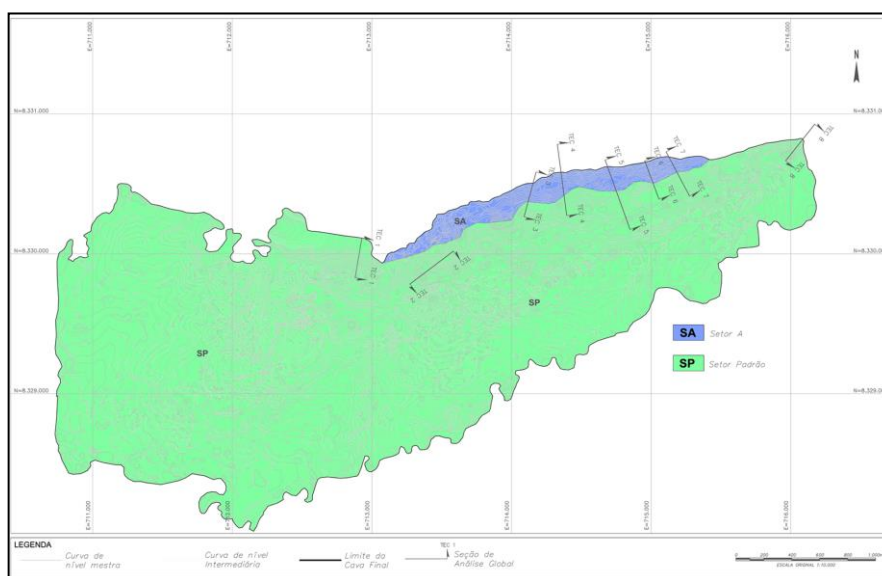


Figura 7. Exemplificação de Setores A e Padrão na Cava de Barro Alto.

As análises realizadas para o Setor A indicaram a necessidade de implementações adicionais de afastamento de 25 metros da crista do talude em relação ao contato tectônico, bem como um afastamento de 35 metros da face do talude para o saprolito de dunito – minério (SPM) em subsuperfície. Para essas condições, foi necessário ainda, garantir um rebaixamento do nível de água em torno de 11 metros, de modo a obter um FS aceitável para o Setor A (Figura 8).

Analogamente, para o Setor Padrão, foi observado a necessidade de adicionar um afastamento de 50 metros da face do talude para o saprolito de dunito – minério (SPM) em subsuperfície, além de garantir um rebaixamento do nível de água em 25 metros (Figura 8).

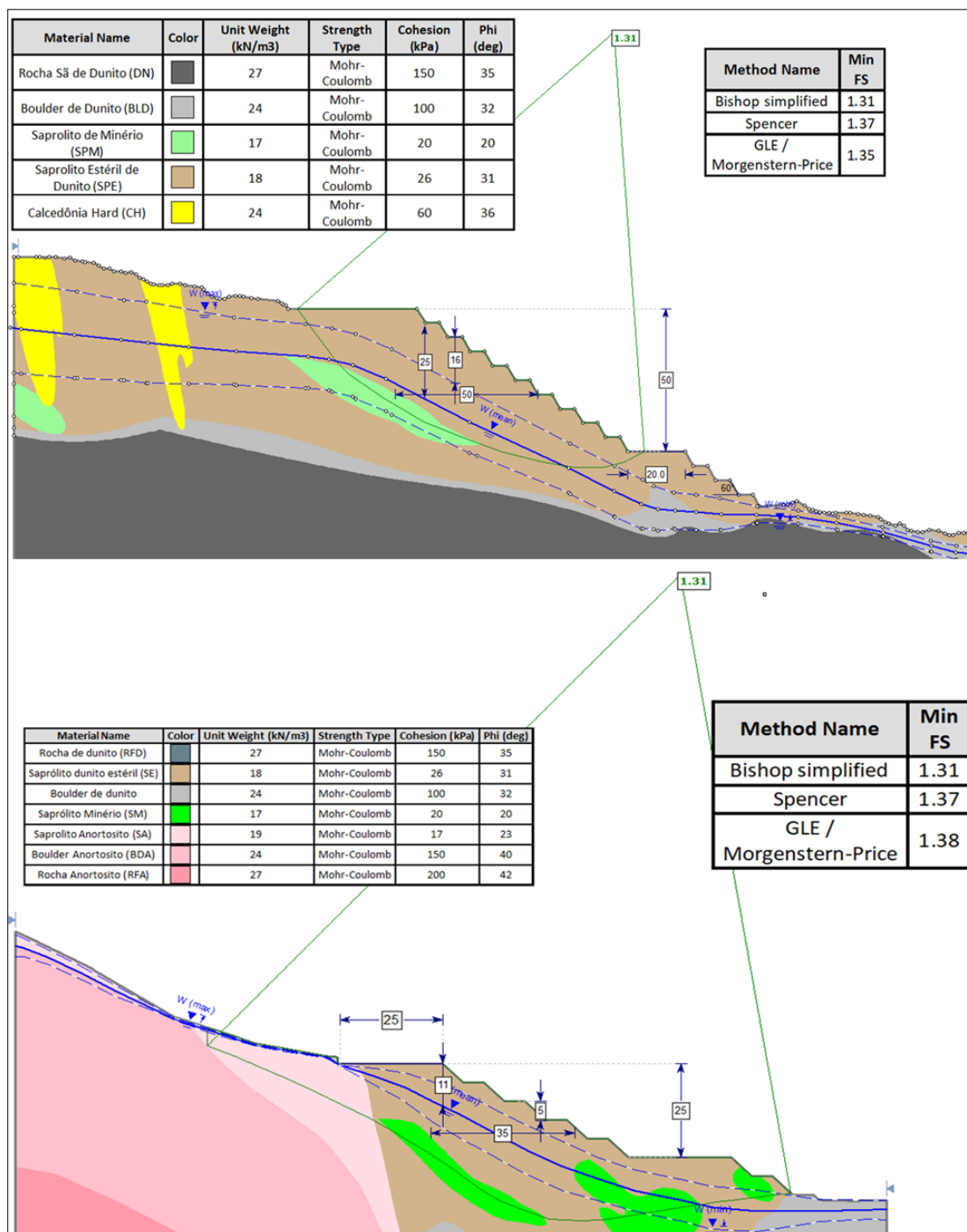


Figura 8. Análises de estabilidade realizadas com implementação das geometrias definidas para os setores A e Padrão para Mina de Barro Alto.

Assim, a Tabela 3 apresenta um resumo da proposição de geometria para os setores A e Padrão definidos para a Cava de Barro Alto.

Tabela 3. Proposição de Geometria para o Setor A e Setor Padrão da Mina de Barro Alto

Setor	Horizonte	Bancada		Entre rampa		Berma de Segurança (m)	Observações para o cenário mais crítico.	
		Altura (m)	Berma (m)	Ângulo de Face (°)	Altura Máxima (m)			Ângulo Máximo (°) - Pé a Pé
Setor A	Saprolito	5	5	45	25	27	25	Profundidade do NA (max): 11 m Distância da crista do talude para a unidade Anortosítica/Contato Tectônico: 25 m Afastamento horizontal da face do talude para camada de minério em subsuperfície: 35 m
	Rochoso	5	5	65	60	43	15	
Padrão	Saprolito	5	5	60	50	32	20	Profundidade do NA (max): 25 m Afastamento horizontal da face do talude para camada de minério em subsuperfície: 50 m
	Rochoso	5	5	65	50	43	15	

5. CONCLUSÕES

O estudo representa uma evolução no conhecimento da mina de Barro Alto, principalmente relacionado ao modelo geológico-geotécnico, estabilidade e geometrias da cava, bem como entendimento dos principais mecanismos de rupturas identificados na mina. No entanto, ainda há diversos desafios na área devido ao complexo contexto geológico-estrutural e condições hidrogeológicas desfavoráveis em setores específicos, sendo necessário uma continuidade e evolução dos trabalhos até então realizados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a equipe da Anglo American e TEC3 pelo empenho no desenvolvimento estudo.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. M. M., HASUI, Y., NEVES, B. B. & FUCK, R. A. Brazilian structural provinces: na introduction. *Earth Sciences Reviews*, 17, 01-09, 1981.

CORREIA, C. T.; JOST, H; TASSINARI, C. C. G., GIRARDI, V. A. V., KINNY, P. Ectasian Mesoproterozoic U-Pb ages (SHRIMP-II) for the metavolcanosedimentary Sequences of Juscelândia and Indainópolis and for High-Grade Metamorphosed Rocks of Barro Alto Stratiform Igneous Complex, Goiás State, Central Brazil. In: SAAGI- South American Symposium on Isotopic Geology, v.2. Actas SEGEMAR, Córdoba, 31-33p. 1999.

FERREIRA FILHO, C. F.; KAMO, S.; FUCK, R. A.; KROGH, T. E., NALDRET, A. J. Zircon and Rutile Geochronology of the Niquelândia Layered Mafic and Ultramafic Intrusion, Brazil: Constrains for the Timing of Magmatism and High Grade Metamorphism. *Precambrian Research*, 68, 241-255p, 1994.

FERREIRA FILHO, C. F., PIMENTEL, M. M., ARAUJO, S. M., LAUX, J. H. Layered Intrusion and Volcanic Sequences in Central Brazil: Geological and Geochronological Constrains for Mesoproterozoic (1.25 Ga) and Neoproterozoic (0.79 Ga) Igneous Associations. *Precambrian Research.*, v. 183, n. 3, 617-634p, 2010.

ISRM.1981. Suggested Methods: Rock Characterization, Testing and Monitoring, 1981 (ed. E. T. Brown), 129-40.

MARTIN, D. STACEY, P. 2018. Cemented Sediments. Guidelines for Open Pit Slope Design in Weak Rocks, D. Martin and P. Stacey (eds.), CSIRO Publishing, Melbourne, Australia, 127-167.

PIMENTEL, M. M., FUCK, R. A., JOST, H., FERREIRA FILHO, C. F., ARAUJO, S. M. The Basement of the Brasília Fold Belt and the Goiás Magmatic Arc. In: Tectonic Evolution of South America, Eds: Cordani, U.G., Milani, E. J., Thomaz Filho, A., Campos, D. A. 31° International Geological Congress, Rio de Janeiro 195-230p, 2000.

PIMENTEL, M. M.; FERREIRA FILHO, C. F.; ARMSTRONG, R. A. SHRIMP U-Pb and Sm-Nd ages of the Niquelândia Layered Complex: Meso (1.25 Ga) and Neoproterozoic (0.79 Ga) Extensional Events in Central Brazil. *Precambrian Research*, 132, 133-153p, 2004.

ROCSCIENCE INC. 2016, Critical Slip Surface Search Methods in Slide 7.0 – A Guide to Search Methods in Slide 7.0. RocNews Spring, 2016.