

## ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES QUE COMPÕEM UMA CAVA A CÉU ABERTO NO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

Ayla Velloso Keppel<sup>1</sup>; Camila Broetto Milli<sup>2</sup>; Lucas Pereira Leão<sup>3</sup>; Silas Santos Salgado<sup>4</sup>; Alberto Ferreira Amaral Júnior<sup>5</sup>

**Resumo** – Este trabalho apresenta uma análise de estabilidade de taludes em uma cava a céu aberto de minério de ferro localizada no Quadrilátero Ferrífero, no flanco oeste do Sinclinal Moeda. Foram integrados dados de mapeamento geológico-geotécnico, ensaios laboratoriais e interpretações de sondagens para caracterização detalhada dos maciços rochosos e definição dos parâmetros geomecânicos representativos dos principais litotipos da área de estudo. A metodologia adotada envolveu a aplicação de sistemas de classificação consagrados, como RMR, GSI e *Weak Rock*, além de análises cinemáticas e análises de estabilidade via equilíbrio limite com base nas características estruturais da cava e nas orientações das principais descontinuidades. Os fatores de segurança obtidos por meio dos métodos de Spencer e Morgenstern-Price indicaram estabilidade para as seções analisadas dentro dos critérios segundo Wesseloo e Read. A abordagem permitiu a identificação de domínios litogeomecânicos distintos e a obtenção de parâmetros de resistência, que podem ser utilizados como referência técnica em projetos futuros em contextos geológicos semelhantes. O estudo reforça a importância da integração entre dados geológicos, geotécnicos e estruturais em avaliações de estabilidade, contribuindo para o avanço seguro da lavra e o aprimoramento do conhecimento técnico sobre os materiais presentes na região.

**Abstract** – This work presents a slope stability analysis for an open-pit iron ore mine located in the Quadrilátero Ferrífero, on the western flank of the Moeda Syncline. Data from geotechnical-geological mapping, laboratory tests, and borehole interpretations were integrated for detailed rock mass characterization and the definition of representative geomechanical parameters for the main lithotypes in the study area. The adopted methodology involved the application of established classification systems, such as RMR, GSI, and *Weak Rock*, along with kinematic analyses and limit equilibrium stability analyses based on the structural features of the pit and the orientations of the main discontinuities. The safety factors obtained using the Spencer and Morgenstern-Price methods indicated stability for the analyzed sections according to the criteria of Wesseloo and Read. The approach enabled the identification of distinct lithogeomechanical domains and the derivation of strength parameters, which can be used as technical references for future projects in similar geological contexts. The study reinforces the importance of integrating geological, geotechnical, and structural data in stability assessments, contributing to the safe advancement of mining operations and the enhancement of technical knowledge regarding the materials present in the region.

**Palavras-Chave** – Classificação geomecânica; Estabilidade de taludes; Parâmetros de resistência; Cava a céu aberto; Quadrilátero Ferrífero.

---

1 Eng. Geól., Universidade Federal de Ouro Preto, (31) 9677-6608, ayla.keppel@aluno.ufop.edu.br  
2 Eng. Geól., MSc, DF+ ENGENHARIA – BRIDGE HOLDING, (27) 9929-9273, cmilli@dfmais.eng.br  
3 Eng. Geól., PhD, Universidade Federal de Ouro Preto, (31) 8511-7690, lucas.leao@ufop.edu.br  
4 Geól., PhD, DF+ ENGENHARIA – BRIDGE HOLDING, (31) 8497-2587, ssalgado@dfmais.eng.br  
5 Geól., MSc, DF+ ENGENHARIA – BRIDGE HOLDING, (31) 8455-9716, aamaral@dfmais.eng.br

## 1. INTRODUÇÃO

A análise de estabilidade de taludes em cavas a céu aberto é uma etapa essencial no planejamento e operação de empreendimentos minerários, visto que influencia diretamente a segurança operacional, o aproveitamento do minério e os custos associados à lavra. Em regiões geologicamente complexas, como o Quadrilátero Ferrífero, no estado de Minas Gerais, esse tipo de estudo exige uma abordagem integrada, que considere a variabilidade litológica, os diferentes graus de alteração dos materiais e a presença de estruturas geológicas que condicionam o comportamento dos maciços.

Inserido no contexto do flanco oeste do Sinclinal Moeda, nas adjacências do Sinclinal Dom Bosco, o presente trabalho tem como objetivo principal avaliar a estabilidade dos taludes de uma cava de minério de ferro em operação, utilizando análises cinemáticas e de equilíbrio limite baseadas em dados geológico-geotécnicos detalhados. Adicionalmente, busca-se fornecer parâmetros geomecânicos representativos dos principais litotipos presentes na área de estudo, de modo a subsidiar futuras avaliações técnicas e contribuir com a base de dados de projetos em andamento ou planejados em contextos geológicos semelhantes.

Para isso, foram empregados métodos de classificação geomecânica consolidados, como RMR e GSI, além da classificação *Weak Rock* para materiais friáveis, complementados por ensaios laboratoriais e dados de campo obtidos por mapeamentos e sondagens. As análises foram conduzidas com foco na interpretação das estruturas e condições que regem o comportamento dos taludes no cenário atual da cava, fornecendo uma avaliação robusta e aplicável ao contexto da mineração no Quadrilátero Ferrífero.

## 2. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada na porção sudoeste do Quadrilátero Ferrífero, em região marcada pela interseção entre estruturas sinclinais (Renger, 1994; Dorr, 1969). O arcabouço geológico compreende unidades litológicas que vão do Arqueano ao Cenozoico. O embasamento cristalino é formado por rochas granito-gnáissicas de idade Arqueana a Proterozoica. Sobre esse embasamento, ocorrem unidades do Supergrupo Rio das Velhas, representadas por rochas metavulcânicas e metassedimentares associadas a um *greenstone belt* arqueano. Em sequência, encontram-se as rochas metassedimentares proterozóicas do Supergrupo Minas, seguidas pelas unidades do Supergrupo Estrada Real, compostas por rochas metassedimentares depositadas em uma bacia restrita de idade pré-Cambriana (Ladeira, 1980; Rosière, Chemale Jr. e Oliveira, 2000). Por fim, a cobertura mais recente é representada pelos depósitos cenozoicos, constituídos por sedimentos acumulados em bacias restritas.

Na área de estudo foram identificados diversos litotipos com características geomecânicas e graus de intemperismo variados. O xisto (XIS), inserido no Grupo Nova Lima do Supergrupo Rio das Velhas, ocorre predominantemente nas áreas periféricas da cava e nas regiões externas, sendo classificado como *weak rock*, com resistência principalmente R0 (extremamente branda) e, em menor proporção, R1– (muito branda inferior). O grau de intemperismo é elevado, com predominância de W5 (completamente intemperizado) e ocorrência pontual de W6 (solo residual).

O quartzito (QTZ) é encontrado apenas em áreas externas e de forma pontual. Apresenta alta resistência (R5), baixo intemperismo (W1 a W2) e fraturamento moderado (F2), caracterizando maciços de qualidade muito boa a excelente (Classe I–II segundo Bieniawski, 1976) e classificação GSI variando de regular a excelente (Hoek e Brown, 1997).

O filito (FIL), pertencente à Formação Batatal, do Grupo Caraça no Supergrupo Minas, aflora como *weak rock*, geralmente com resistência R1– e grau de intemperismo W5. Em áreas externas ao norte da cava, ocorre em condição ligeiramente mais resistente devido à silicificação, apresentando resistência R1+ e intemperismo W4. Em alguns pontos, a resistência é R0, com estruturas como acamamento e fraturas bem marcadas, mesmo em saprólito. Trata-se de um material de alta erodibilidade, localmente média, com forte anisotropia estrutural.

Os itabiritos (silicoso, goethítico e intercalado), por sua vez, estão inseridos no Grupo Itabira, também pertencente ao Supergrupo Minas, e ocorrem em diversas formas litológicas e graus de alteração. O itabirito silicoso (ITS) ocorre nas formas friável, compacto e médio. O tipo friável (ISF) é predominantemente R1–, com poucos afloramentos R1+ e R2–, apresentando alto grau de intemperismo (W5), embora com estruturas preservadas. O tipo compacto (ISC) apresenta resistência entre R4 e R5, com predominância de R4, baixo a médio intemperismo (W2 a W3) e fraturamento elevado (F3). A maioria dos pontos apresenta GSI entre 41 e 60. Já o tipo médio (ISM) possui resistência entre R2+ e R3, com predominância de R2+, intemperismo geralmente W4 e fraturamento elevado (F3 a F4), sendo classificado principalmente como maciço Classe IV, com algumas ocorrências Classe III.

O itabirito silicoso intercalado ao itabirito goethítico (ITS–IGO) também ocorre em duas formas distintas. O tipo friável (ITSF–IGOF) apresenta metade dos afloramentos com resistência R1–, enquanto o restante apresenta predominantemente R1+, com poucos casos R2– ou R0. O intemperismo predominante é W5, com estruturas preservadas e minerais bastante alterados. O tipo compacto (ITSC–IGOC) apresenta resistência variando entre R2+ e R5, predominando entre R2+ e R4. O grau de intemperismo varia de W2 a W4, com predominância deste último, e o fraturamento é elevado (F3), com algumas ocorrências F2. Predominam maciços Classes III e IV, com GSI entre 41 e 60.

O itabirito goethítico (IGOF) ocorre exclusivamente como *weak rock*, com resistência variando entre R0 e R1–, e grau de intemperismo W5. Apesar da intensa alteração mineral, o bandamento original permanece preservado.

Por fim, as rochas intrusivas (INT) afloram majoritariamente como *weak rock*, com resistência R0 e R1–. No entanto, em alguns pontos, atingem resistência R2+ e R3, representando variações locais no comportamento geomecânico.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para esse trabalho, tomou-se como base as informações obtidas a partir dos mapeamentos geológico-geomecânicos — com metodologia RMR (*Rock Mass Rating*) (Bieniawski, 1976) e GSI (*Geological Strength Index*) (Hoek, 1994) —, a compreensão das informações presentes nos testemunhos de sondagem, análises cinemáticas, além do modelo geológico-geomecânico, os quais refletem as informações da cava atual.

De posse das informações obtidas nos processos predecessores, conforme supracitado, foi possível caracterizar a cava quanto às condições geomecânicas predominantes, observando-se variação de resistência dos maciços, com predominância de materiais classificados como *Weak Rocks* (Cella *et al.*, 2019) (R0 a R2–), intercalados a zonas de maior resistência (acima de R2+).

Além disso, as descontinuidades foram identificadas e mapeadas, sendo a região composta por acamamento (So), bandamento (Sb), foliação e xistosidade (Sn), além de fraturas (Fr). As descontinuidades mais expressivas foram consideradas de acordo com a atitude e com a direção das seções analisadas, tanto em etapa prévia de análise cinemática quanto, nesta etapa, nas análises de equilíbrio limite, por meio da consideração da anisotropia.

A avaliação de estabilidade dos taludes foi realizada por meio da análise de equilíbrio limite, tanto em nível entre rampa quanto global, considerando os mecanismos de ruptura cunha, planar e tombamento. Apenas os mecanismos de ruptura com probabilidade superior a 10% foram considerados, conforme os critérios estabelecidos por Priest e Brown (1983).

Para as análises, utilizou-se o *software* Slide2 da Rocscience, que possibilitou a avaliação das rupturas interrampas e globais dos taludes por meio dos métodos de Spencer e GLE/Morgenstern-Price (1965), que analisam o equilíbrio de forças e momentos por lamelas de cálculo.

A análise também considerou as características das descontinuidades presentes nos taludes, com especial atenção à anisotropia das resistências, às tensões atuantes nos volumes de

material durante as rupturas e aos parâmetros das descontinuidades, como rugosidade e resistência. Para as seções situadas no setor geométrico paralelo à principal descontinuidade, foi adotada a função *anisotropic function* para representar os parâmetros de resistência das foliações, xistosidades e bandamentos, sempre que essas informações estavam disponíveis. Também foram avaliadas rupturas circulares e não circulares, representativas dos taludes estudados, utilizando a função de busca por cunhas *Cuckoo search*.

Nas análises determinísticas, foram adotados fatores de segurança (FoS) mínimos de acordo com o nível de criticidade, como 1,3 para ruptura global, 1,2 a 1,3 para ruptura interrampa em condições operacionais e 1,5 em casos de interferência com obras civis, conforme recomendado por Wesseloo e Read (2009).

Além disso, o nível d'água foi considerado por meio da superfície traçada no *software* Surfer, com o input das informações de leitura de nível d'água em instrumentos adjacentes às operações, como Indicadores de Nível D'Água (INA's) e Piezômetros (PZ's).

### 3.1. Avaliação litoestrutural e geométrica da cava

Com base nas informações obtidas nas etapas anteriores, foi realizada a avaliação litoestrutural da cava, que resultou na delimitação de sete domínios estruturais. A definição desses domínios considerou o padrão de distribuição das estruturas, como xistosidade e foliação, as famílias de fraturas e a presença dos diferentes litotipos em cada região.

Além disso, foi realizada a setorização geométrica da cava por meio de geoprocessamento, com agrupamento de trechos com variações de até 20° na direção de mergulho dos taludes. A partir de análise estatística, definiu-se a orientação média representativa de cada setor.

Com base nas avaliações estrutural e geométrica, foram definidos dois setores estruturais para as análises de rupturas condicionadas por anisotropia, considerando a relação entre a orientação das descontinuidades e das faces dos taludes: o Setor Estrutural 1 representa os taludes paralelos à principal anisotropia, enquanto o Setor Estrutural 2 compreende taludes com orientação oblíqua ou oposta.

Essas avaliações foram fundamentais para a definição das seções críticas utilizadas nas análises cinemáticas e de estabilidade, pois permitiram identificar os trechos mais representativos em termos de orientação estrutural, geometria dos taludes e condições geomecânicas (Figura 1).

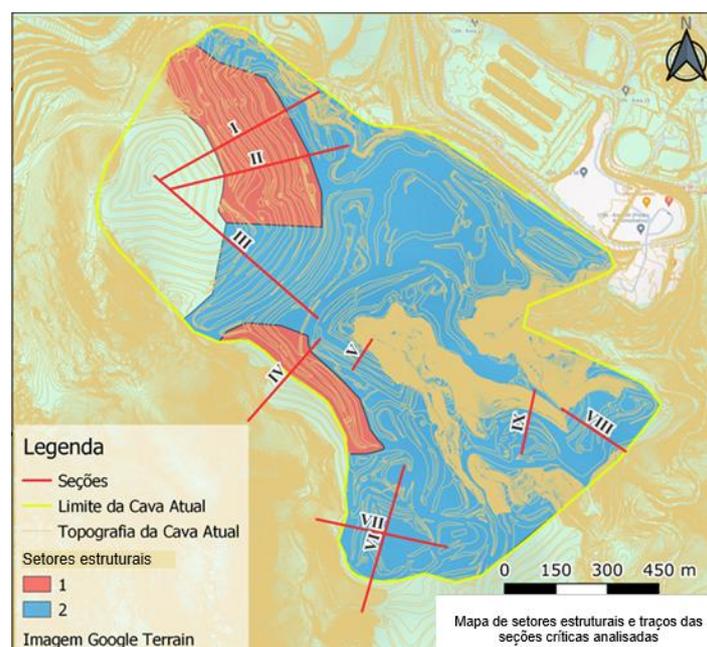


Figura 1. Mapa de setores estruturais e traços das seções críticas analisadas.

### 3.2. Ensaio e parâmetros

A caracterização dos materiais foi realizada a partir da análise de ensaios laboratoriais, considerando dados de campanhas anteriores e ensaios mais recentes. Foram analisadas diversas litologias presentes na cava, cada uma avaliada individualmente com base em suas características geomecânicas específicas, de modo a garantir representatividade e precisão na definição dos parâmetros.

Os ensaios foram classificados de acordo com três critérios principais: (i) validade por litotipo, (ii) capacidade de fornecer parâmetros de resistência (como coesão, ângulo de atrito, UCS, etc.) e (iii) utilidade na definição do grau de alteração dos materiais. Apenas os ensaios que apresentaram qualidade técnica adequada foram considerados válidos.

Foi realizada, ainda, uma análise qualitativa e quantitativa para identificar a influência da anisotropia no comportamento do material e na direção de ruptura observada, especialmente em saprólitos e rochas foliadas.

Os tipos de ensaios realizados, com os respectivos parâmetros obtidos, foram:

- Caracterização física (solos): peso específico dos grãos, teor de umidade, índice de vazios, limites de Atterberg e distribuição granulométrica;
- Ensaio de cisalhamento direto (solos e saprólitos): coesão ( $c$ ) e ângulo de atrito ( $\phi$ );
- Compressão uniaxial (rochas): resistência à compressão simples (UCS), módulo de elasticidade ( $E$ ) e coeficiente de Poisson ( $\nu$ );
- Compressão triaxial (solos e *weak rocks*): parâmetros de resistência ao cisalhamento e resposta à poropressão em condições não drenadas;
- *Point Load Test* (rochas): índice de resistência à compressão pontual, com correlação posterior à UCS.

Na definição dos critérios de ruptura, adotou-se o critério de Mohr-Coulomb para solos e saprólitos, considerando ajustes para anisotropia nos saprólitos, e o critério de Hoek-Brown para os materiais rochosos mais competentes. Os parâmetros obtidos e validados foram inseridos no *software* RocLab 1.0, visando à obtenção dos parâmetros de resistência mobilizados para cada grupo litológico.

### 3.3. Banco de dados de sondagem e integração de dados

O banco de dados de sondagens da área de estudo foi utilizado como referência para a validação dos ensaios laboratoriais e para a classificação litogeomecânica dos materiais. As descrições dos testemunhos de sondagem foram consideradas a fonte mais confiável para correlação entre litologia, grau de alteração e resistência.

A integração entre os dados de laboratório e de campo foi conduzida de forma a garantir coerência entre os ensaios válidos e os registros de sondagem. As amostras analisadas em laboratório foram correlacionadas às respectivas litologias descritas nos testemunhos, verificando-se sua representatividade e adequação geotécnica. Foram priorizadas as amostras com registros fotográficos, coordenadas espaciais ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) e informações detalhadas sobre grau de alteração e resistência.

Essa abordagem possibilitou a construção de um banco de dados integrado e confiável, subsidiando a modelagem geomecânica da cava e a definição dos parâmetros de entrada para as análises de estabilidade. A validação cruzada entre mapeamento, ensaios e sondagens também permitiu identificar domínios geomecânicos consistentes, associados a diferentes litotipos e comportamentos estruturais.

#### 4. RESULTADOS

Os parâmetros representativos dos materiais presentes na área de estudo foram obtidos com base nos resultados dos ensaios e nas análises estatísticas, conforme apresentado a partir da Tabela 1 a Tabela 5.

Tabela 1. Parâmetros compilados para os materiais existentes nas seções de análise.

Filito - FL (FGF, FLF, FLC)					
Índices	Classe I-II	Classe III	Classe IV	R2- a R1-	R0
Fonte*	1,2,5,6 e 7	1,2,5,6 e 7	1,2 e 5	4	4
g(kN/m <sup>3</sup> )	28,2	28,2	28,2	17,5	14,5
s <sub>c</sub> (MPa)	79,79	45,44	31,56	-	-
GSI	58	54	40	-	-
mi	6,38	6,38	6,38	-	-
mb	1,424	1,234	0,748	-	-
s	0,0094	0,006	0,0013	-	-
a	0,503	0,504	0,511	-	-
c (kN/m <sup>2</sup> )	-	-	-	-	-
f (°)	-	-	-	-	-
c // (kN/m <sup>2</sup> )	-	-	-	32	6
f // (°)	-	-	-	28	21
c _/ (kN/m <sup>2</sup> )	-	-	-	63	14
f _/ (°)	-	-	-	28	21
Ângulo	-	-	-	Variável	-

\* Fontes dos parâmetros das tabelas 1 a 5: 1) CESP; 2) GOLDER; 3) LENC; 4) PATTTROL; 5) UFMG; 6) Ensaios in situ; 7) Base de dados de sondagem; 8) Outros projetos no Quadrilátero Ferrífero; 9) Ajuste inferido a partir dos ensaios existentes, para as classes de maciços faltantes; 10) Projetos adjacentes; 11) Valentim (2016); 12) Parâmetros estimados e projetos similares na mesma região para utilização em litotipos cujas classes de maciços indicadas não foram ensaiadas.

Tabela 2. Parâmetros compilados para os materiais existentes nas seções de análise.

Itabirito - IT (IC, IF, IS, IHMF, IHMC)					
Índices	Classe I-II	Classe III	Classe IV	R1- a R2-	R0
Fonte*	1,2 e 5	1,2,5,6 e 7	1,2,5,6 e 7	1 e 2	1 e 2
g(kN/m <sup>3</sup> )	33,39	33,07	30	22,3/24,1	22,3
s <sub>c</sub> (MPa)	107	75	35	-	-
GSI	63	52	42	-	-
mi	8,8	6,8	4,8	0	-
mb	2,39	1,2	0,61	-	-
s	0,0172	0,005	0,0017	-	-
a	0,502	0,505	0,51	-	-
c (kN/m <sup>2</sup> )	-	-	-	-	36
f (°)	-	-	-	-	38
c // (kN/m <sup>2</sup> )	-	-	-	42	-
f // (°)	-	-	-	38	-
c _/ (kN/m <sup>2</sup> )	-	-	-	42	-
f _/ (°)	-	-	-	42	-
Ângulo	-	-	-	Variável	-

Tabela 3. Parâmetros compilados para os materiais existentes nas seções de análise.

Itabirito Goethítico IGO - (IGOC, IGOF, IMNF, IMNC),				
Índices	Classe II-I	Classe III	Classe IV	R2- a R0
Fonte*	1,2,5,6 e 7	1,2,5,6 e 7	1,2,5,6 e 7	1
g(kN/m <sup>3</sup> )	30	30	30	28
s <sub>c</sub> (MPa)	65,3	48,4	48,4	-
GSI	65	54	40	-
mi	6,1	4,4	4,4	-
D	0	0	0	-
mb	1,706	0,823	0,823	-
s	0,0194	0,0054	0,0054	-
a	0,502	0,505	0,505	-
c (kN/m <sup>2</sup> )	-	-	-	34
f (°)	-	-	-	27
Ângulo	-	-	-	-

Tabela 4. Parâmetros compilados para os materiais existentes nas seções de análise.

Xisto – XT (XTC, XTF)					Rocha Básica – IN (INC, INF)					
Índices	Classe I-II	Classe III	Classe IV	R0	Classe I-II	Classe III	Classe IV	R2-	R1- a R1+	R0
Fonte*	5,6 e 7	5,6 e 7	5,6 e 7	4	2,7 e 9	2,7 e 9	2,7 e 9	10	6	11
g(kN/m <sup>3</sup> )	28,32	28,32	28,32	15,2	28,9	28,9	28,9	20,3	18,5	18/22
s <sub>c</sub> (MPa)	73,35	47,26	30		111,48	75*	17,16	-	-	-
GSI	62	57	47		65	59	40	-	-	-
mi	7,47	7,47	8,9		10,41	10,41	10,41	-	-	-
D	0	0	0		0	0	0	-	-	-
mb	1,922	1,608	1,125		2,985	2,409	1,221	-	-	-
s	0,0147	0,0084	0,0028		0,0205	0,0105	0,0013	-	-	-
a	0,502	0,504	0,507		0,502	0,503	0,511	-	-	-
c (kN/m <sup>2</sup> )	-	-	-	50	-	-	-	88	74	11
f (°)	-	-	-	28	-	-	-	27	27	26
Ângulo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabela 5. Parâmetros compilados para os materiais existentes nas seções de análise.

Quartzito – QT (QZF, QZC)					Colúvio - COL	Canga - CG	Aterro - AT
Índices	Classe I-II	Classe III	Classe IV	R2+ a R0			
Fonte*	5 e 12	5 e 12	5 e 12	5 e 12	12	12	8
g(kN/m³)	26,44	26,44	26,44	18,19	18	22,6/24,9	18
s <sub>c</sub> (MPa)	180,27	95,07	35	-	-	-	-
GSI	65	60	29	-	-	-	-
mi	24.99	24.99	21,825	-	-	-	-
D	0	0	0	-	-	-	-
mb	6,904	5,775	2	-	-	-	-
s	0,0205	0,0117	0,0004	-	-	-	-
a	0,502	0,503	0,524	-	-	-	-
c (kN/m²)	-	-	-	9,3	6	30	5
f (°)	-	-	-	34,4	27	30	28
Ângulo	-	-	-	-	-	-	-

Seguindo a metodologia supramencionada e os parâmetros sumarizados, todas as seções foram analisadas conforme a Figura 2, que exemplifica a análise de estabilidade conforme realizado para a Seção I, considerando os materiais existentes na escavação conforme classificação litogeomecânica, tomando como premissa a anisotropia (devido a localização no Setor Estrutural 1), o nível d'água e os fatores de segurança mínimos obtidos. Essa abordagem foi seguida para todas as demais seções.

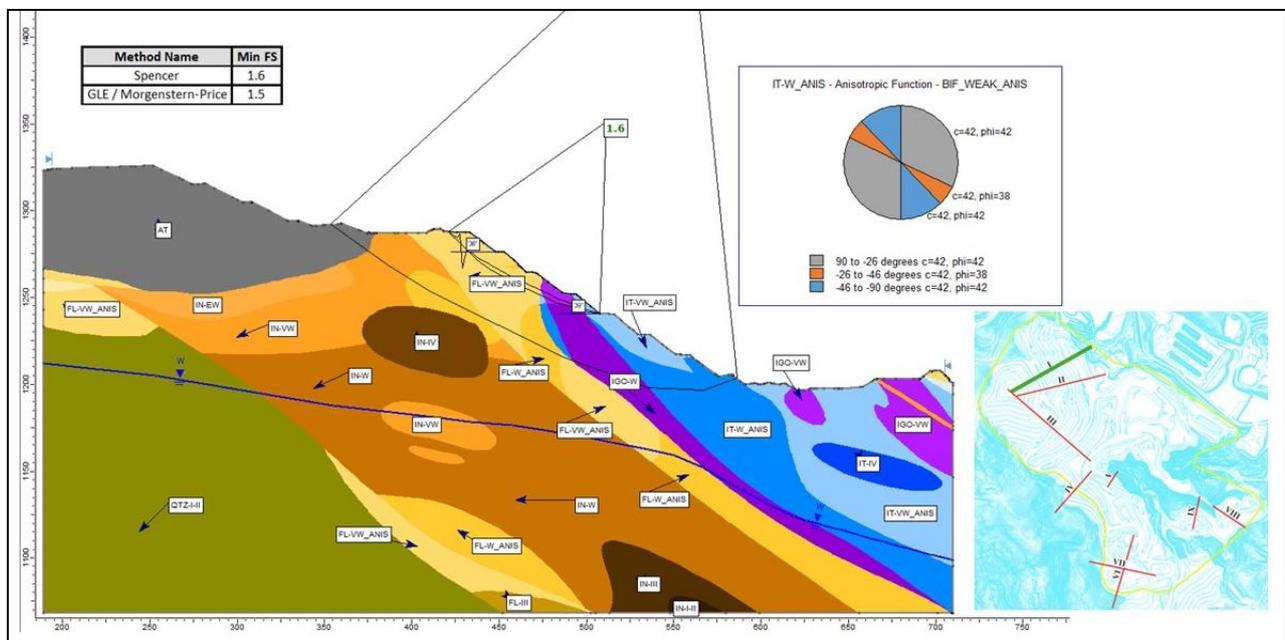


Figura 2. Análise de estabilidade da seção I.

A seção analisada é composta por uma variedade de materiais litológicos que refletem a complexidade geológica da área estudada. Foram identificadas as seguintes unidades: aterro superficial; itabiritos classificados como weak com anisotropia (IT-W\_ANIS), very weak com anisotropia (IT-VW\_ANIS), classe IV (IT-IV), além de itabirito goethítico nas classes weak e very weak (IGO-W e IGO-VW). Também ocorrem filitos classificados como weak e very weak com

comportamento anisotrópico (FL-W\_ANIS e FL-VW\_ANIS), além de filito classe III (FL-III). As rochas intrusivas aparecem em diferentes estados de alteração e resistência, sendo mapeadas nas classes very weak e weak (IN-VW e IN-W), assim como nas classes I-II, III e IV (IN-I-II, IN-III e IN-IV). Por fim, ocorre ainda a presença de quartzito classificado como I-II (QTZ-I-II), representando uma litologia mais resistente dentro do conjunto.

Ao realizar as análises de estabilidade, foram obtidos resultados satisfatórios para os fatores de segurança (FoS) seguindo os valores de referência propostos por Wesseloo e Read (2009), conforme Tabela 6, a qual apresenta todos os valores encontrados nas análises, tanto segundo o método Spencer (1967) quanto pelo método GLE/Morgenstern-Price (1965), junto a escala de ruptura mínima atrelado a esse fator de segurança.

Tabela 6. Fatores de segurança obtidos nas análises para a geometria da cava atual.

Seção	FoS Mínimo		Escala
	Spencer	GLE/Morgenstern-Price	
I	1,6	1,5	Interrampa
II	1,7	1,7	Interrampa
III	1,5	1,5	Interrampa
IV	2,7	2,7	Interrampa
V	1,6	1,6	Interrampa
VI	2,9	2,8	Global
VII	1,5	1,5	Interrampa
VIII	2,3	2,3	Interrampa
IX	1,4	1,4	Global

Salienta-se que para o cenário de cava atual, com essa geometria analisada, não se fez necessária a análise de bancada para rupturas condicionadas por descontinuidades (cunha, planar e tombamentos), uma vez que afloramentos rochosos (Classes geomecânicas I-II; III e IV) dispõem-se na cava de maneira pouco expressiva, na forma de lentes incipientes.

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como foco a análise de estabilidade dos taludes que compõem uma cava a céu aberto de minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero, especificamente no flanco oeste do Sinclinal Moeda nas adjacências do Sinclinal Dom Bosco, a partir da integração de dados geológicos, geotécnicos e geomecânicos obtidos por meio de mapeamento de campo, ensaios laboratoriais e interpretação de sondagens. As análises foram conduzidas com base em metodologia consolidada, incluindo classificação geomecânica (RMR, GSI e *Weak Rock*) e análises de estabilidade via equilíbrio limite, considerando tanto rupturas circulares quanto condicionadas por anisotropia.

A caracterização litogeomecânica detalhada permitiu identificar os diferentes comportamentos dos materiais presentes na cava, evidenciando a heterogeneidade dos maciços e a influência das estruturas geológicas locais. A partir da validação cruzada entre dados de campo e laboratório, foram definidos parâmetros de resistência representativos para cada litotipo, levando em conta o grau de alteração, resistência, anisotropia e condições estruturais. Esses parâmetros, obtidos a partir de uma metodologia robusta, configuram-se como uma importante referência para estudos futuros em empreendimentos com características geológicas semelhantes.

As análises de estabilidade realizadas demonstraram adequação da geometria atual dos taludes às condições geomecânicas da cava, com fatores de segurança compatíveis com os critérios adotados segundo Wesseloo e Read (2009). A abordagem utilizada mostrou-se eficaz tanto para a compreensão do comportamento dos taludes quanto para a geração de um banco de dados técnico confiável, aplicável à modelagem e ao planejamento de escavações em ambientes com elevada complexidade estrutural.

Dessa forma, o estudo contribui não apenas para a gestão técnica da cava analisada, como também para o aprimoramento de práticas em geotecnia aplicada à mineração, ao fornecer subsídios metodológicos e parâmetros de resistência validados, úteis para futuros projetos e avaliações de estabilidade.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos à DF+ Engenharia pela oportunidade concedida e pelo incentivo à pesquisa, fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- BIENIAWSKI, Z. T. Rock mass classification in rock engineering. In: BIENIAWSKI, Z. T. (Ed.). *Exploration for rock engineering*. Proceedings of the Symposium, Johannesburg, p. 97–106, 1976.
- CELLA, P. R.; ALMEIDA, L. G.; CASTRO, L. M. Geomechanical classification in weak rock masses: application of a modified RMR system to an open pit mine. In: *14th International Symposium of the International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering (ISRM)*, Foz do Iguaçu, Brasil, 2019.
- DORR, J. V. N. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *U.S. Geological Survey Professional Paper*, 341-B, 255 p., 1969.
- HOEK, E. Strength of rock and rock masses. *ISRM News Journal*, v. 2, p. 4–16, 1994.
- LADEIRA, E. A. O Grupo Minas: reavaliação da estratigrafia e evolução geológica dos quadriláteros ferríferos e estruturas correlatas. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 10, n. 3, p. 139–158, 1980.
- MORGENSTERN, N. R.; PRICE, V. E. The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique*, v. 15, n. 1, p. 77–93, 1965.
- PRIEST, S. D.; BROWN, E. T. Probabilistic stability analysis of variable rock slopes. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, Section A: Mining Industry, v. 92, p. A1–A12, 1983.
- RENGER, F. E. Geologia da região do Quadrilátero Ferrífero. In: ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y. (Eds.). *O Cráton do São Francisco*. São Paulo: Instituto de Geociências, USP, p. 53–77, 1994.
- ROSIÈRE, C. A.; CHEMALE JR., F.; OLIVEIRA, C. G. Petrogênese e evolução tectônica do Grupo Itabira no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 30, n. 1, p. 23–28, 2000.
- SPENCER, E. A method of analysis of the stability of embankments, assuming parallel interslice forces. *Geotechnique*, v. 17, p. 11–26, 1967.
- VALENTIM, M. C. S. Caracterização geomecânica e modelagem numérica de taludes em mina a céu aberto em condições geológicas complexas – Quadrilátero Ferrífero, MG. 156 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.
- WESSELOO, J.; READ, J. Guidelines for open pit slope design: acceptance criteria. In: READ, J.; STACEY, P. (Eds.). *Guidelines for open pit slope design*. Collingwood: CSIRO Publishing, p. 221–236, 2009.