



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



AYLA VELLOSO KEPPEL

**CARACTERIZAÇÃO DE MACIÇO ROCHOSO E ANÁLISE
DE ESTABILIDADE DE TALUDES DE UMA CAVA A CÉU
ABERTO:
ESTUDO DE CASO NO QUADRILÁTERO FERRÍFERO – MG**

OURO PRETO

Maio 2025

AYLA VELLOSO KEPPEL

**CARACTERIZAÇÃO DE MACIÇO ROCHOSO E ANÁLISE
DE ESTABILIDADE DE TALUDES DE UMA CAVA A CÉU
ABERTO:
ESTUDO DE CASO NO QUADRILÁTERO FERRÍFERO – MG**

Monografia do Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação da disciplina Projeto Final de Curso II – GEO144, ano 2024/2.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Pereira Leão
Co-orientadora: Camila Broetto Milli

OURO PRETO

2025

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

K38c Keppel, Ayla Velloso.
Caracterização de maciço rochoso e análise de estabilidade de taludes de uma cava a céu aberto [manuscrito]: estudo de caso no Quadrilátero Ferrífero - MG. / Ayla Velloso Keppel. - 2025.
99 f.: il.: color., tab., mapa. + Quadro.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Pereira Leão.
Coorientadora: Ma. Camila Broetto Milli.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .

1. Geotecnia. 2. Geologia de engenharia. 3. Taludes (Mecânica do solo) - Estabilidade. 4. Caracterização geomecânica. 5. Cinemática. I. Leão, Lucas Pereira. II. Milli, Camila Broetto. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 624.131.5

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Ayla Velloso Keppel

Caracterização de maciço rochoso e análise de estabilidade de taludes de uma cava a céu aberto: estudo de caso no Quadrilátero Ferrífero - MG

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Geológica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Geóloga

Aprovada em 26 de maio de 2025

Membros da banca

Dr - Lucas Pereira Leão - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Dra - Mônica Pessoa Neves - Universidade Federal de Ouro Preto
Ms - Gabriel Luca Nascimento - SAFF Engenharia

Lucas Pereira Leão, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 11/06/2025



Documento assinado eletronicamente por **Lucas Pereira Leão, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/06/2025, às 15:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0930030** e o código CRC **96E8428F**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, que sempre me impulsionaram e apoiaram na escolha e na conquista da graduação em Engenharia Geológica. Às minhas irmãs, que foram e continuam sendo meu maior porto seguro, minha gratidão por todo o carinho, apoio e torcida incondicional.

Ao Otávio, meu companheiro de jornada, agradeço por estar ao meu lado em todos os momentos, pelo suporte constante, paciência e amor durante toda a graduação. Estendo meus agradecimentos a toda a minha família, cuja torcida e incentivo foram essenciais para que eu chegasse até aqui.

Agradeço à Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e ao Departamento de Geologia por toda a formação proporcionada ao longo desses anos. Um agradecimento especial aos professores Alice, Tazava e Issamu, pelos ensinamentos, paciência e incentivo contínuo, que tanto contribuíram para minha formação acadêmica e pessoal.

Aos meus amigos, agradeço pela colaboração, parceria e amizade, fundamentais para tornar essa caminhada mais leve e possível. Sem vocês, o percurso teria sido muito mais difícil.

Agradeço especialmente ao Gabriel (Calops) e à Ana Daher, cuja base fornecida foi essencial para a realização deste trabalho.

Aos meus orientadores, Lucas Leão e Camila Milli, deixo meu sincero reconhecimento e gratidão por toda a paciência, suporte e valiosos ensinamentos. Sem vocês, este trabalho não seria possível. Agradeço também ao Silas e ao Alberto, por permitirem e apoiarem o desenvolvimento desta pesquisa.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para essa trajetória, o meu muito obrigado!

RESUMO

O trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto aborda a caracterização de maciços rochosos e a análise de estabilidade de taludes de uma cava a céu aberto localizada no Sinclinal Moeda, no Quadrilátero Ferrífero, uma região geologicamente significativa no estado de Minas Gerais, conhecida mundialmente pela expressiva concentração de depósitos de ferro, ouro e manganês, além de sua complexa estrutura tectônica e diversidade litológica, que a tornam um importante objeto de estudo para as geociências. O estudo integrou métodos clássicos de classificação geomecânica, como RMR, GSI e *Weak Rock*, além de análises cinemáticas e de estabilidade de taludes via equilíbrio limite, com o objetivo de compreender os mecanismos de ruptura e fornecer ângulos de face para garantir a segurança estrutural da escavação. A caracterização geológica-geomecânica dos maciços rochosos revelou uma grande heterogeneidade litológica, com materiais que variam de rochas brandas a mais resistentes, e a presença de estruturas geológicas, como fraturas e acamamentos, que influenciam diretamente a estabilidade dos taludes. As análises cinemáticas identificaram zonas de risco associadas a rupturas planares e em cunha, especialmente em áreas onde as descontinuidades estavam alinhadas com a orientação dos taludes. A avaliação de equilíbrio limite indicou fatores de segurança dentro dos valores aceitáveis para as seções analisadas, refletindo o cenário de cava atual, e também revelou áreas críticas que necessitam de intervenções, como ajustes geométricos, implantação de bermas ou sistemas de drenagem. Os resultados do estudo contribuem para a otimização operacional da cava, propondo um modelo metodológico aplicável a contextos semelhantes, e ressaltam a importância do monitoramento contínuo e da adaptação às condições dinâmicas do maciço rochoso. A pesquisa destaca a necessidade de integrar dados geológicos, geotécnicos e geomecânicos em projetos de engenharia, visando a segurança, a eficiência e a sustentabilidade das operações de escavação.

Palavras-chave: Caracterização geomecânica de maciços rochosos; análise cinemática; análise de estabilidade.

ABSTRACT

The undergraduate thesis presented to the Universidade Federal de Ouro Preto addresses the characterization of rock masses and the stability analysis of slopes in an open pit mine located within the Moeda Syncline, in the Quadrilátero Ferrífero. This is a geologically significant region in the state of Minas Gerais, renowned worldwide for its substantial concentration of iron, gold, and manganese deposits, as well as its complex tectonic structure and lithological diversity, making it an important subject of study for the geosciences. The study integrated classical geomechanical classification methods, such as RMR (Rock Mass Rating), GSI (Geological Strength Index), and Weak Rock classification, alongside kinematic analyses and limit equilibrium slope stability analyses. The objective was to understand failure mechanisms and propose safe slope angles to ensure the structural safety of the excavation. The geological-geomechanical characterization of the rock masses revealed significant lithological heterogeneity, with materials ranging from low-strength to more competent rocks. The presence of geological structures, such as fractures and bedding planes, was found to directly influence slope stability. Kinematic analyses identified hazard zones associated with planar and wedge failures, particularly in areas where discontinuities were aligned with the slope orientation. The limit equilibrium assessment indicated factors of safety within acceptable ranges for the analyzed sections, reflecting the current pit scenario. However, it also revealed critical areas requiring interventions, such as geometric adjustments, implementation of berms, or drainage systems. The study results contribute to the operational optimization of the pit, proposing a methodological model applicable to similar contexts. They also emphasize the importance of continuous monitoring and adaptation to the dynamic conditions of the rock mass. The research underscores the necessity of integrating geological, geotechnical, and geomechanical data into engineering projects to ensure the safety, efficiency, and sustainability of excavation operations.

Keywords: Geological-geomechanical characterization of rock masses; Kinematic analysis; Stability analysis

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	OBJETIVO	10
1.1.1	Objetivos específicos.....	10
1.2	LOCALIZAÇÃO.....	11
1.3	JUSTIFICATIVA	11
2	CONTEXTO GEOLÓGICO.....	13
2.1	CRÁTON SÃO FRANCISCO	13
2.2	QUADRILÁTERO FERRÍFERO	14
2.3	EVOLUÇÃO TECTÔNICA	16
2.4	ARCABOUÇO ESTRATIGRÁFICO REGIONAL	18
2.4.1	Complexos Metamórficos	19
2.4.2	Supergrupo Rio das Velhas.....	19
2.4.3	Supergrupo Minas	19
2.4.4	Supergrupo Estrada Real	20
2.4.5	Coberturas Cenozóicas	20
2.5	ARCABOUÇO ESTRATIGRÁFICO LOCAL	20
2.5.1	Supergrupo Rio das Velhas – Grupo Nova Lima	21
2.5.2	Supergrupo Minas – Formação Moeda	21
2.5.3	Supergrupo Minas – Formação Batatal	22
2.5.4	Supergrupo Minas – Formação Itabira.....	22
2.5.5	Rocha Intrusiva.....	22
2.5.6	Coberturas Cenozoicas – Colúvios.....	23
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
3.1	CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS.....	24
3.1.1	Classificação RQD (Rock Quality Designation).....	25
3.1.2	Classificação RMR (<i>Rock Mass Rating</i>).....	27
3.1.3	Classificação GSI (<i>Geological Strength Index</i>).....	30
3.1.4	Classificação <i>Weak Rock</i>	32
3.1.5	Ensaio de Compressão Uniaxial.....	37
3.1.6	Ensaio de Compressão Triaxial	38
3.1.7	Ensaio esclerométrico.....	39
3.1.8	Mapeamento geomecânico	39

3.2	ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES.....	40
3.2.1	Análise cinemática	40
3.2.2	Propriedades físicas e propriedades de resistência dos materiais.....	41
3.2.2.1	Critério de ruptura de Mohr-Coulomb	41
3.2.3	Análise de bancada (Via Equilíbrio Limite).....	42
3.2.4	Análise de estabilidade global (Via Equilíbrio Limite).....	43
3.2.5	Métodos de análise	43
3.2.5.1	Spencer	43
3.2.5.2	GLE / Morgenstern-Price	44
4	METODOLOGIA	46
4.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	46
4.2	análise dos dados recebidos.....	47
4.2.1	Levantamento geológico-geotécnico.....	47
4.2.1.1	Maçãos brando (<i>Weak rock</i>)	48
4.2.1.2	Maçãos resistentes (RMR)	48
4.2.1.3	Sistema GSI.....	48
4.2.2	Avaliação geométrica	49
4.2.3	Avaliação litoestrutural.....	49
4.3	ANÁLISE CINEMÁTICA.....	49
4.3.1	Base teórica para as análises	50
4.3.1.1	Ruptura planar	50
4.3.1.2	Ruptura em cunha.....	50
4.3.2	Critérios adotados para as análises cinemáticas	51
4.4	COMPILAÇÃO DE ENSAIOS LABORATORIAIS.....	52
4.5	ANÁLISE DE ESTABILIDADE	53
5	RESULTADOS.....	55
5.1	CARACTERIZAÇÃO LITOGEO MECÂNICA	55
5.1.1	Xisto (XIS)	56
5.1.2	Quartzito (QTZ)	56
5.1.3	Filito (FIL).....	57
5.1.4	Itabirito Silicoso (ITS):	58
5.1.5	Itabirito Silicoso Intercalado a Itabirito Goethítico (ITS-IGO).....	59
5.1.6	Itabirito Goethítico (IGOF)	59

5.1.7	Intrusiva (INT)	59
5.2	CARACTERIZAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES	63
5.2.1	Acamamento (So).....	64
5.2.2	Bandamento (Sb).....	64
5.2.3	Foliação/Xistosidade (Sn)	64
5.2.4	Fraturas (Fr).....	64
5.3	ANÁLISE CINEMÁTICA.....	69
5.3.1	Setorização geométrica.....	69
5.3.2	Domínios litoestruturais	70
5.4	PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA LITOLÓGICA.....	75
5.5	ANÁLISE DE ESTABILIDADE	80
5.5.1	Seção I.....	81
5.5.2	Seção VI	83
5.5.3	Seção IX	83
6	CONCLUSÕES	85
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
	APÊNDICE A – Seções Analisadas	92

1 INTRODUÇÃO

Os taludes desempenham um papel fundamental na estruturação de diversas obras de engenharia, como rodovias, ferrovias, barragens, edificações e cavas de mineração (Duncan; Wright; Brandon, 2014; Hoek, 2007). A estabilidade desses elementos é crucial para garantir a segurança das estruturas associadas, por isso, compreender os mecanismos de falha e empregar métodos de avaliação adequados torna-se essencial (Marques, 2021).

A classificação geomecânica de taludes é um processo complexo, que exige a análise de diversos parâmetros geotécnicos (Hoek e Brown, 1980; Palmstrom, 2005). Essa etapa é determinante para a compreensão do comportamento e da estabilidade dos taludes, reforçando a necessidade da escolha criteriosa de métodos de análise compatíveis com as particularidades de cada projeto (Caputo, 2022).

A definição do método mais apropriado e dos critérios de classificação depende das condições específicas do talude, como o uso previsto (a curto ou a longo prazo), a composição do material (terroso, rochoso ou misto), o tipo de solo ou rocha presente, e a presença de descontinuidades ou anisotropias (Bieniawski, 1989; Hoek, 2007). Diante dessas variáveis, torna-se indispensável investigar e comparar diferentes sistemas de classificação de maciços, a fim de fornecer uma base mais realista para a parametrização e análise dos taludes em estudo (Barton, 1973; Bieniawski, 1989).

1.1 OBJETIVO

O objetivo deste estudo é realizar a análise de estabilidade de nove taludes além da classificação litogeomecânica e parametrização dos materiais presentes em uma mina a céu aberto de minério de ferro. Para tanto, serão consideradas as influências geológicas e geomecânicas, incluindo as estruturas geológicas e as características físicas das litologias que compõem a área de estudo.

1.1.1 Objetivos específicos

Este trabalho tem como objetivos específicos realizar a análise cinemática dos taludes e desenvolver análises de estabilidade utilizando o método de equilíbrio limite, considerando os cenários de estabilidade interrampas e global.

1.2 LOCALIZAÇÃO

A região analisada situa-se no sudeste do Brasil, na porção centro-sudeste do estado de Minas Gerais. Em termos geológico-geotectônicos, a área de estudo se localiza no flanco oeste do Sinclinal Moeda, nas adjacências do Sinclinal Dom Bosco, na porção sudoeste do Quadrilátero Ferrífero (Alkmim e Marshak, 1998; Dorr, 1969). A Figura 1-1 ilustra a localidade aproximada da mina estudada.

Figura 1-1 - Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Google satélite *basemap*.

1.3 JUSTIFICATIVA

O estudo da estabilidade de taludes na engenharia é crucial devido aos riscos que a instabilidade dessas estruturas pode representar para a segurança pública e o meio ambiente. Bem como o melhor ângulo de face de taludes de mineração garante a segurança e evita a diluição do minério (Hoek e Bray, 1977; Read e Peter, 2009). Compreender os fatores que influenciam a estabilidade dos taludes é essencial para mitigar riscos, proteger vidas, recursos naturais, além de contribuir para práticas mais eficazes na engenharia, mineração e geotecnia, garantindo a otimização dos recursos minerais (Brady e Brown, 2004; Wyllie e Mah, 2004).

Além disso, o avanço tecnológico oferece novas ferramentas para avaliar e monitorar taludes, enquanto a pesquisa acadêmica continua explorando abordagens teóricas e práticas para a estabilidade dessas estruturas. Portanto, um trabalho de conclusão de curso nessa área é justificado pela sua relevância social, aplicabilidade prática e potencial contribuição para o conhecimento científico e técnico, sobretudo contribuindo com a parametrização dos materiais da região analisada.

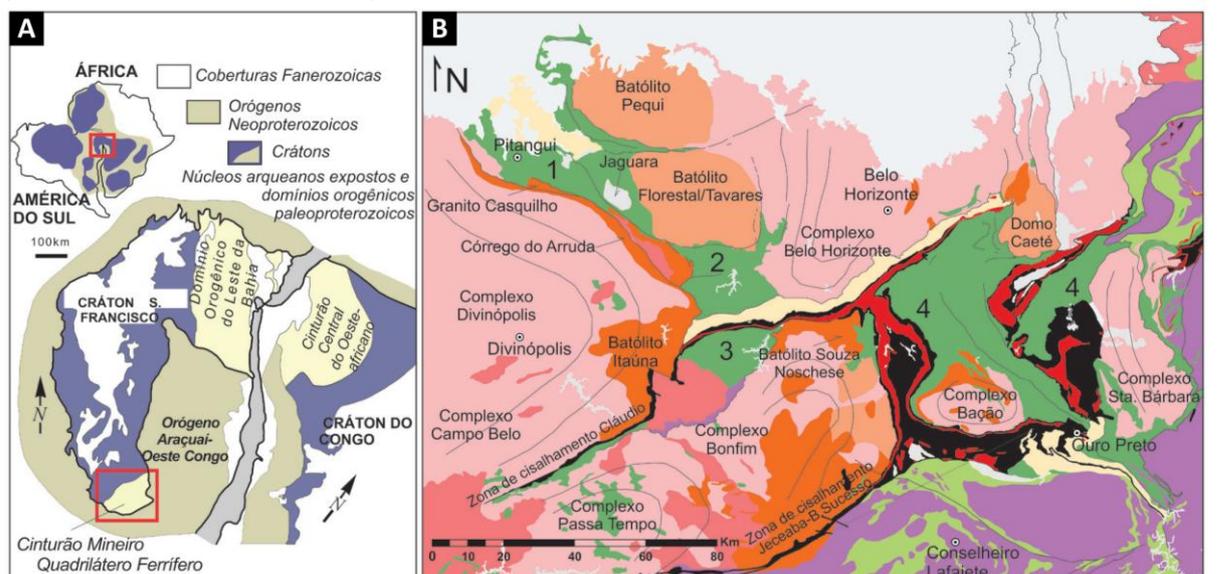
2 CONTEXTO GEOLÓGICO

A região de análise está localizada a Sul do Cráton São Francisco, na província Mineral do Quadrilátero Ferrífero. As informações referentes ao contexto geológico de localização serão detalhadas a seguir.

2.1 CRÁTON SÃO FRANCISCO

O Cráton São Francisco (CSF) está localizado na região central-leste do Brasil e é circundado por cinturões orogênicos brasileiros, sendo o Borborema ao norte, o Tocantins a oeste e o Mantiqueira a leste (Figura 2-1). Grande parte de sua área interna é coberta por unidades sedimentares pré-cambrianas e fanerozoicas. A leste do CSF, encontra-se a Província da Margem Continental Leste, enquanto a noroeste situa-se o Cinturão Orogênico Rio Preto (Endo; Castro; Gandini, 2020).

Figura 2-1 – A) Localização geotectônica do Quadrilátero Ferrífero, na porção sul do Cráton São Francisco (modificado de ALKMIM et al., 2007); B) Mapa geológico simplificado do Quadrilátero Ferrífero e redondezas (modificado de SILVA et al., 2020).



1- Sinclínório Pitangui, 2- Sinclínório Mateus Leme, 3- Sinclínório Souza, 4- Greenstone belt Rio das Velhas

- | | |
|--|--|
| Sequência de rochas < 1.8 Ga | Sequências metassedimentares paleoproterozoicas sin a pós orogênicas (flysch e molassa) |
| Gnaisses e rochas graníticas paleoproterozoicas | Sequências greenstone belt paleoproterozoicas |
| Metassedimentos associados a rifte e/ou margem passiva paleoproterozoicos (ff) formações ferríferas bandadas | Rochas graníticas neoarqueanas (Médio-K; Alto-K; Indiferenciadas) |
| Greenstone belts e intrusões máficas-ultramáficas associadas meso a neoarqueanas | Gnaisses TTG mesoarqueanos |

Fonte: CPRM (2022)

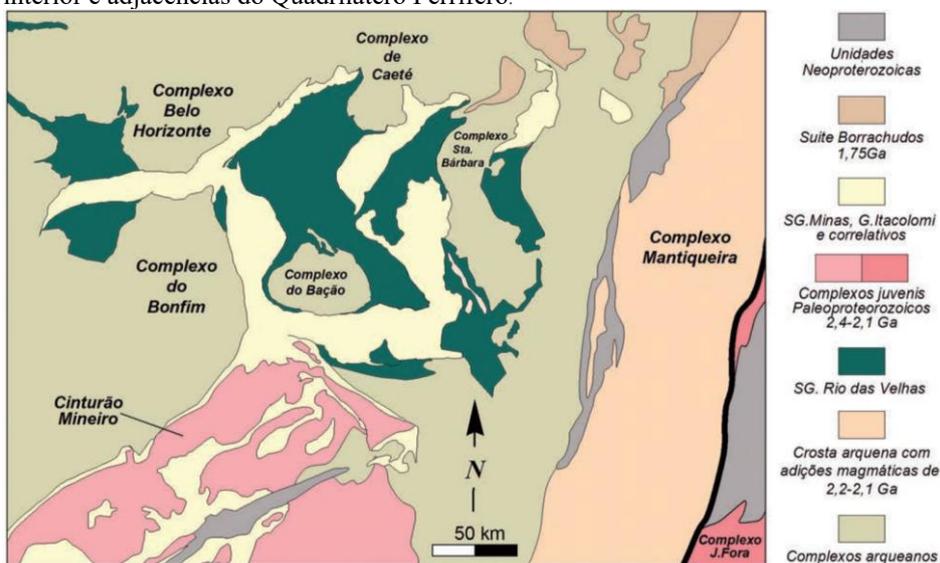
O embasamento geológico do Cráton São Francisco, composto por rochas com idades superiores a 1,8 bilhão de anos, encontra-se exposto no extremo sul, incluindo o Quadrilátero Ferrífero e suas regiões adjacentes, bem como no setor norte, no Estado da Bahia (Alkmim *et al.*, 2017; Farina *et al.*, 2016);

A evolução geotectônica da porção sul do Cráton São Francisco pode ser subdividida em três eventos, conforme proposto por Alkmim e Marshak (1989). Segundo os autores, inicialmente, durante o ciclo Transamazônico, ocorreu a abertura e fechamento de bacias, com prevalência da deformação por encurtamento crustal. Em seguida, no Uruçuano, após o período de encurtamento crustal, observa-se uma fase de extensão acompanhada pela intrusão de diques máficos. O último evento, conhecido como Brasiliano, é caracterizado por uma fase compressional, evidenciada por dobras de orientação NS e falhas de empurrão.

2.2 QUADRILÁTERO FERRÍFERO

O Quadrilátero Ferrífero (QFe) está localizado na porção centro-sudeste do Estado de Minas Gerais e sua extensão abrange aproximadamente 12.000 km² (Alkmim e Marshak, 1998; Dorr, 1969). A região é nomeada assim por ter seus depósitos de minério de ferro acomodados em serras de maneira similar a um polígono de quatro lados (Figura 2-2.) (Alkmim; Martins-Neto; Travassos, 2006). O QFe pode ser classificado como uma das principais regiões minerais do mundo (Alkmim; Martins-Neto; Travassos, 2006; Dorr, 1969; Rosière; Rios; Kuchenbecker, 2010).

Figura 2-2 - Mapa geológico esquemático com a localização dos vários complexos gnaisses e granitoides do interior e adjacências do Quadrilátero Ferrífero.



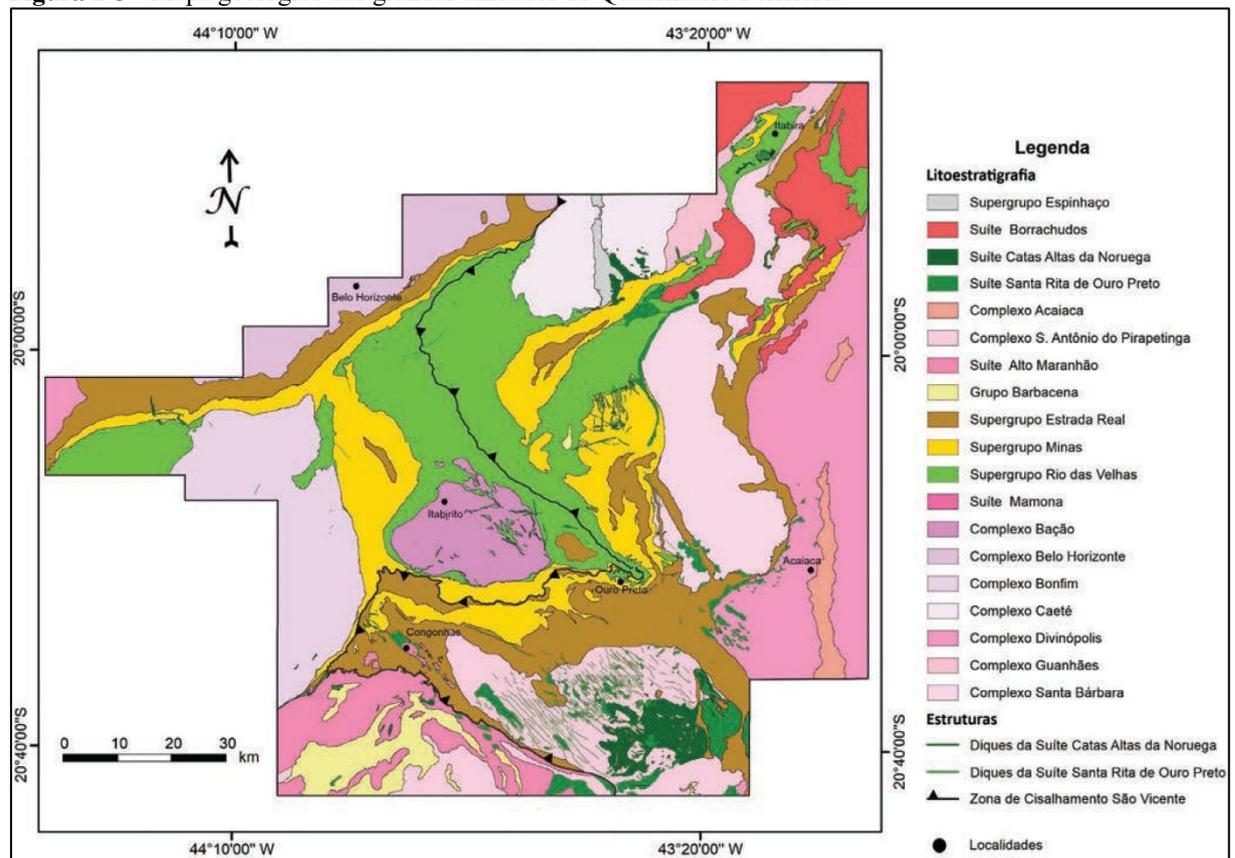
Fonte: Alkmim (2020)

O QFe é marcado por *greenstone belts* neoarqueanos, envolvidos por complexos gnáissicos e cobertos por rochas metassedimentares paleoproterozoicas (Alkmim e Marshak, 1998; Dorr, 1969). Assim, ele engloba diversas unidades geológicas formadas em períodos distintos, que ao longo do tempo geológico se aproximaram ou se sobrepuseram estratigraficamente (Alkmim; Martins-Neto; Travassos, 2006; Rosière e Chemale Jr, 2000).

O Quadrilátero Ferrífero é uma região geologicamente complexa e faz parte de dois principais componentes geotectônicos: o Cráton São Francisco (CSF) e a Faixa Brasileira Araçuai (Alkmim; Martins-Neto; Travassos, 2006).

As rochas do Quadrilátero Ferrífero estão classificadas em unidades litoestratigráficas e formações de idade pré-cambriana, incluindo os complexos metamórficos, o Supergrupo Rio das Velhas, o Supergrupo Minas, o Supergrupo Estrada Real e o Grupo Barbacena. Além disso, há também unidades sedimentares que datam do Cenozoico, conforme destacado por Endo *et al.* (2020) e ilustrado na Figura 2-3.

Figura 2-3 - Mapa geológico das grandes unidades do Quadrilátero Ferrífero.

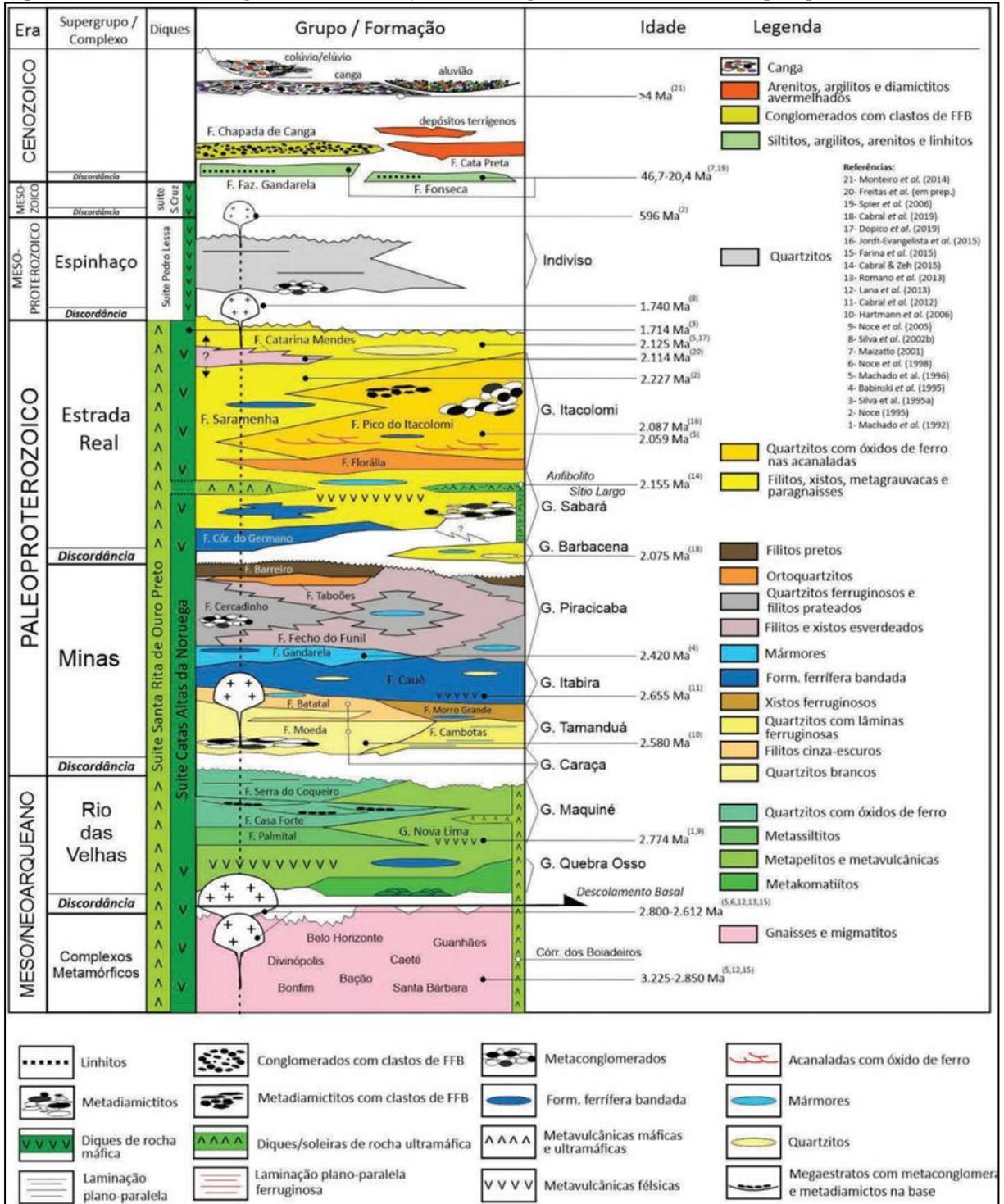


Fonte: Endo *et al.* (2020).

2.3 EVOLUÇÃO TECTÔNICA

Os limites atuais do Cráton do São Francisco são definidos pelas Faixas neoproterozóicas Araçuaí-Ribeira, Brasília, Rio Preto, Riacho do Pontal e Sergipana, estabelecidas durante o evento orogênico Brasileiro, conforme é ilustrado na Figura 2-4.

Figura 2-4 - Coluna estratigráfica com as relações entre as grandes unidades e os litotipos que as constituem.



Fonte: Endo *et al.* (2020).

O Quadrilátero Ferrífero, no sentido geotectônico, encontra-se posicionado no limite sul do Cráton do São Francisco. Este Cráton possui idade arqueana, que passou por processos de deformação e metamorfismo durante o Ciclo Brasileiro, conforme destacado por Almeida em (1977).

As rochas do embasamento ocorrem em domos, como os do Bação, Bonfim, Caeté, Belo Horizonte e Santa Rita, os quais estão envolvidos por sinclinais, como os Moeda e Dom Bosco, e por uma grande estrutura homoclinal da Serra do Curral, que contém o Supergrupo Rio das Velhas e o Supergrupo Minas. No contato entre as rochas Supracrustais e as rochas do embasamento ao redor dos domos, ocorrem zonas de cisalhamento (Endo; Castro; Gandini, 2020).

No Quadrilátero Ferrífero, as estruturas mais comuns são domos e quilhas. Existem dois tipos principais de estruturas. O primeiro tipo é formado por dobras regionais com direção nordeste, como o Sinclinal Gandarela, o Anticlinal de Conceição e o Sinclinal de Itabira. O segundo tipo é formado por falhas de empurrão com vergência para oeste, que são mais recentes e estão relacionadas à Orogenia Brasileira (Alkmim e Marshak, 1998; Alkmim; Martins-Neto; Travassos, 2006). As rochas do QFe também apresentam estruturas penetrativas, como xistosidade, foliação milonítica, clivagem de crenulação, lineações minerais e lineações de intercessão. Essas estruturas são resultado do retrabalhamento de estruturas pré-existentes pela Orogenia Brasileira (Alkmim e Marshak, 1998; Pedrosa-Soares e Alkmim, 2013).

Atribuída por Alkmim e Marshak (1998), a deformação das rochas do Supergrupo Minas e do Membro Itacolomi está relacionado a três eventos principais:

i. Evento Arqueano

O Evento Arqueano é subdividido em dois outros eventos, os compressionais D1 e D2. O primeiro é responsável pela formação de dobras de tamanhos variados, zonas de cisalhamento e falhas de empurrão com direção sudeste-noroeste. A deformação heterogênea e progressiva é distintivamente marcada em conjunto com a evolução do metamorfismo. O segundo, D2, é composto por falhas reversas e zonas de cisalhamento que se formaram durante o evento compressivo norte-sul. Este evento afetou a região sul do QFe e gerou dobras em escala macro e mesoscópica, com eixo na direção leste-oeste (Alkmim e Marshak, 1998).

ii. Evento Transamazônico

O Evento Transamazônico, também é subdividido em dois eventos, sendo o D3 compressivo e o D4 distensivo. O D3 teve como resposta ao evento compressional E-W e distintas dobras e falhas. As falhas de empurrão são consideradas as estruturas mais significativas, formadas na borda leste com orientação N-S. Neste evento, o bloco superior do domo Bação foi envolvido no processo de deformação, resultando na alteração das estruturas pré-existentes dos sinclinais Moeda e Dom Bosco. Em razão disso, o anticlinal Mariana sobre o Rio das Velhas pode ser interpretado como a evolução de uma extensa *nappe* originada a partir das rochas do embasamento. Já o evento D4 se caracterizou como um evento distensivo, o qual permitiu o soerguimento de blocos do embasamento, que teve como consequência a estruturação da Serra do Curral e os Sinclinais Moeda, Dom Bosco, Santa Rita e Gandarela. Nos contatos dos domos com as rochas circundantes, desenvolveram-se zonas de cisalhamento normais (Alkmim e Marshak, 1998).

Além disso, foi definido por Baltazar e Zucchetti (2007) um quinto evento, dado como:

iii. Evento Brasileiro (Porção Oriental do Quadrilátero Ferrífero)

A deformação D5 tem como representante regional uma foliação com direções NW, NS e NE, e mergulhos medianos para E. A atitude da foliação é associada a rampas frontais e oblíquas dos *fronts* de empurrão, com movimento de massa com direção E-W, que são estruturas marcantes da fase D5. O sistema de cisalhamento Fundão-Cambotas é uma megaestrutura formada pela interação das falhas do Fundão, das Cambotas e da Água Quente na Serra do Caraça (Baltazar e Zucchetti, 2007).

2.4 ARCABOUÇO ESTRATIGRÁFICO REGIONAL

O arcabouço estratigráfico do Quadrilátero Ferrífero (QFe) compreende, em sua base, os Complexos Metamórficos arqueanos (3,22–2,68 Ga), formados predominantemente por granitoides do tipo TTG (tonalito-trondhjemitó-granodiorito) (Alkmim e Marshak, 1998; Renger *et al.*, 1994). Sobre essas unidades ocorrem as rochas do Supergrupo Rio das Velhas, caracterizado como um cinturão de greenstone composto por xistos, quartzitos e formações ferríferas (Alkmim; Martins-Neto; Travassos, 2006). Em discordância erosiva, o Supergrupo Minas, de idade paleoproterozoica, reúne uma sequência de rochas metassedimentares

distribuídas em cinco grupos principais (Alkmim e Marshak, 1998). Sucessivamente, o Supergrupo Estrada Real e o Supergrupo Espinhaço apresentam litologias siliciclásticas e ferríferas (Endo; Castro; Gandini, 2020). Por fim, ocorrem coberturas cenozoicas compostas por depósitos aluviais, eluviais e cangas ferruginosas, associadas à intensa alteração intempérica da região (Endo; Castro; Gandini, 2020). A Figura 2-4 ilustra essas unidades em coluna estratigráfica.

2.4.1 Complexos Metamórficos

Os Complexos Metamórficos compõem o embasamento do QFe e são constituídos por granito-gnaisses de idade variando de 3,22 a 2,68 Ga, compostos por granitoides TTG (trondhjemiton-tonalito-granodiorito) expressos pelos Complexos Belo Horizonte, Caeté, Santa Bárbara, Bação e Bonfim, além de algumas intrusões graníticas, anfibolíticas e pegmatíticas em corpos menores, como é observado na Figura 2-4 (Farina *et al.*, 2016).

2.4.2 Supergrupo Rio das Velhas

Aflorando em grande parte do Quadrilátero Ferrífero, a sequência de rochas do Supergrupo Rio das Velhas foi caracterizada por Dorr (1969) como Greenstone Belt de idade arqueana, composta por xistos, filitos, formações ferríferas e quartzitos subordinados. Tal Supergrupo é subdividido em Grupo Nova Lima (inferior) e Maquiné (superior), como proposto por Dorr (1969), e Schorscher *et al.* (1982) acrescentaram o Grupo Quebra Osso como unidade ultramáfica basal.

2.4.3 Supergrupo Minas

O Supergrupo Minas é caracterizado por uma sequência de rochas metassedimentares supracrustais de idade paleoproterozoica sobreposta em discordância sobre o Supergrupo Rio das Velhas e o embasamento, conforme descrito por Dorr (1969). Ele abrange cinco unidades principais, organizadas da base para o topo: os sedimentos clásticos dos Grupos Tamanduá e Caraça, os sedimentos químicos do Grupo Itabira, as unidades clásticas e químicas do Grupo Piracicaba e os sedimentos sin-orogênicos do Grupo Sabará (Duque, 2018).

2.4.4 Supergrupo Estrada Real

O Supergrupo Estrada Real foi proposto por Endo *et al.* (2020). e engloba os Grupos Barbacena, Sabará e Itacolomi. Pouco aflorante no QFe e formado como discordância, o Grupo Barbacena é composto por grafita xistos, metacherts, quartzitos, filitos com intercalações de anfíbolito e metaultramáficas. O Grupo Sabará é constituído pelas Formações Córrego do Germano, Saramenha e Catarina, a primeira formada por quartzitos ricos em ferro e formações ferríferas bandadas, a seguinte por xistos com clorita e mica, quartzitos e formações ferríferas bandadas e a última por xistos ricos em quartzo, filitos e quartzitos. O Grupo Itacolomi está no topo desse Supergrupo e é composto por ortoquartzitos da Formação Florália e quartzitos e metaconglomerados variados da Formação Pico do Itacolomi (Endo; Dardenne; Pedrosa-Soares, 2020).

2.4.5 Coberturas Cenozóicas

As coberturas sedimentares do Quadrilátero Ferrífero são compostas, majoritariamente, por alúvios, elúvios com quatro tipos de cangas diferentes, sendo química, rica, estruturada e detriticas, como proposto por Endo *et al.* (2020). Como citado por Dorr (1969), a formação desse material se deu a partir da dissolução do minério de ferro com cimentação decorrente de detritos da Formação Cauê. Os principais depósitos sedimentares cenozóicos no QFe, localizam-se restritos às Bacia do Fonseca.

A Figura 2-4 apresenta a coluna estratigráfica mais atual, evidenciando as principais relações de contato entre as unidades existentes no Quadrilátero Ferrífero.

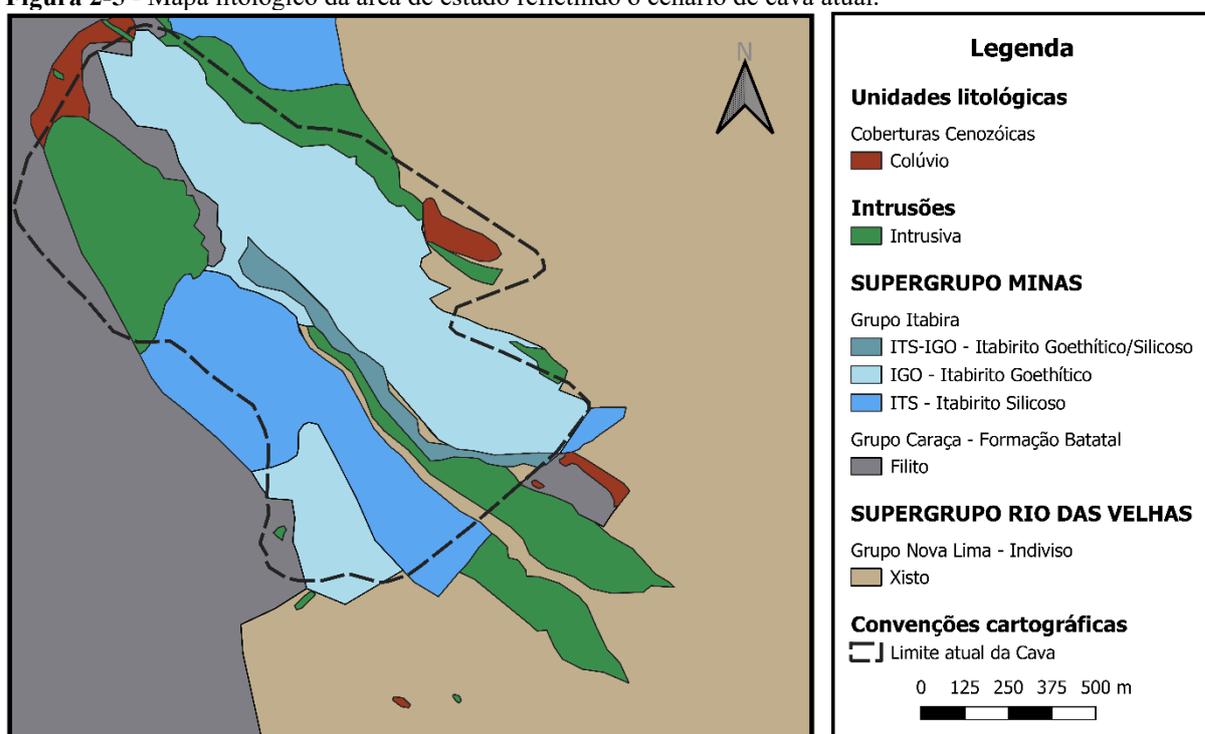
2.5 ARCABOUÇO ESTRATIGRÁFICO LOCAL

O arcabouço estratigráfico é composto por rochas máficas intrusivas que cortam as rochas dos Supergrupos Rio das Velhas e Minas e coberturas cenozoicas coluvionares. Zonas de cisalhamento compressionais dúcteis (Falhas de Empurrão) de direção NW-SE constituem o contato entre o Grupo Nova Lima e as unidades do Supergrupo Minas (Endo; Castro; Gandini, 2020). O mapa litológico da área é apresentado na Figura 2-5.

2.5.1 Supergrupo Rio das Velhas – Grupo Nova Lima

O Grupo Nova Lima aflora na mina e arredores, sendo composto por micaxistos de cores variadas (branco, ocre, marrom, roxo, vermelho e verde). Está presente principalmente nas porções leste e sul da área de estudo, e também próximo à cava, junto a zonas de cisalhamento. No talude de acesso à britagem, o xisto aparece intercalado com camadas de quartzito de até 20 cm. Na região da linha férrea, o xisto apresenta textura milonítica no contato com o quartzito, indicando a presença da Falha do Engenho.

Figura 2-5 - Mapa litológico da área de estudo refletindo o cenário de cava atual.



Fonte: Relatório interno de mapeamento.

2.5.2 Supergrupo Minas – Formação Moeda

Na área oeste da cava, afloram unidades de quartzito no topo da serra, destacando-se na topografia por ocuparem os pontos mais altos. Associados à Formação Moeda, esses quartzitos são bem preservados e ocorrem também no corte da ferrovia e em áreas de drenagem. Apresentam fraturas por onde a água infiltra durante o período chuvoso. São compostos principalmente por ortoquartzitos brancos, com lâminas róseas ou pretas, granulação variada e pequena presença de minerais micáceos. Costumam ter capa de intemperismo preta e exibem foliação e estruturas sedimentares relictuais, como acamamento e estratificações cruzadas. Há

variação composicional de norte a sul: ao norte, o quartzito é mais micáceo e menos preservado; ao sul, é mais recristalizado e maduro texturalmente.

2.5.3 Supergrupo Minas – Formação Batatal

A unidade aflorante ao longo da borda oeste da Pilha Norte e nos taludes da cava, especialmente no norte da cava, corresponde a filitos sericíticos da Formação Batatal. Possuem cor predominantemente cinza claro, com variações marrom, ocre, rosa e branca, marcando o acamamento sedimentar. São compostos principalmente por sericita, com menor presença de quartzo, e frequentemente apresentam dobras e fraturas. A oeste, a formação está em contato inferido com a Formação Moeda, identificado por imagens de satélite. Na área operacional, os filitos fazem contato com rochas intrusivas e itabiritos. Próximo às rochas intrusivas, os filitos tornam-se carbonosos e escurecidos, indicando o contato. Com os itabiritos do Grupo Itabira, o contato é gradual, passando de itabirito silicoso para goethítico até chegar ao filito.

2.5.4 Supergrupo Minas – Formação Itabira

A Formação Itabira, na área da cava, é composta por itabiritos silicosos e goethíticos. Os silicosos, em alguns pontos, são ricos em magnetita e podem ser classificados como magnetitito. Apresentam bandamento milimétrico a centimétrico, com coloração cinza, bandas quartzosas brancas e camadas hematíticas ou magnetíticas em tons escuros. Sua granulação varia de silte a areia muito grossa. Já os goethíticos, menos resistentes, possuem coloração ocre-alaranjada com bandas pretas e granulação de argila a areia fina ou média. Ambos os tipos podem aparecer intercalados. O bandamento é localmente regular e pouco dobrado, mas em grande parte da cava é fortemente dobrado e irregular.

2.5.5 Rocha Intrusiva

A rocha intrusiva aflorante ao norte apresenta composição máfica e grãos de quartzo estirados. Sua coloração varia entre vermelho e verde, conforme o grau de intemperismo. Intrude as rochas do Supergrupo Minas, onde pode haver metamorfismo de contato, com presença de filito carbonoso. Nos contatos com o itabirito, este se torna mais magnetítico e resistente. A rocha é geralmente milonitizada, com foliação SC, mas também ocorre com textura maciça em alguns locais. Em áreas úmidas, especialmente onde é verde, há surgência de água e vegetação em taludes.

2.5.6 Coberturas Cenozoicas – Colúvios

A cobertura coluvionar ocorre principalmente nas margens leste da lavra e em áreas externas à cava. É geralmente delgada, mas pode formar bacias com extensão de metros a dezenas de metros e espessura métrica. Nas áreas externas, apresenta coloração vermelha, matriz silto-argilosa e clastos de areia a granulo, com presença de blocos. Próximo à lavra, predomina colúvio clasto-suportado, com clastos arredondados a angulosos, compostos por material laterizado e itabirito. A matriz varia de areia fina a média, rica em óxidos de ferro. Em alguns pontos, há estratificação cruzada, indicando transporte ao longo da encosta.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo traz uma revisão dos principais conceitos e metodologias encontrados na literatura, fornecendo a base teórica para o estudo de caso apresentado no trabalho. O foco está na caracterização de maciços rochosos e na análise da estabilidade de cavas a céu aberto, temas essenciais na engenharia geotécnica para garantir a segurança das escavações.

A avaliação das condições geomecânicas dos maciços considera fatores como a variação geológica, as propriedades físicas das rochas e a presença de descontinuidades. Para isso, são utilizadas metodologias reconhecidas, como o *Rock Quality Designation* (RQD) (Deere; Deere, 1989), o *Rock Mass Rating* (RMR) (Bieniawski, 1989), o *Geological Strength Index* (GSI) (Hoek; Kaiser; Bawden, 1995) e a abordagem *Weak Rock* (Cella; Castro; Carter, 2020).

Além disso, a estabilidade dos taludes depende de fatores como as características do material, a presença de água e as tensões atuantes. A análise pode ser feita por métodos analíticos ou numéricos, ajudando a entender os riscos envolvidos e a definir medidas para aumentar a segurança das escavações.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS

É fundamental diferenciar os conceitos de rocha e de maciço rochoso em projetos de engenharia para uma compreensão e um planejamento mais eficaz (Jaques, 2014).

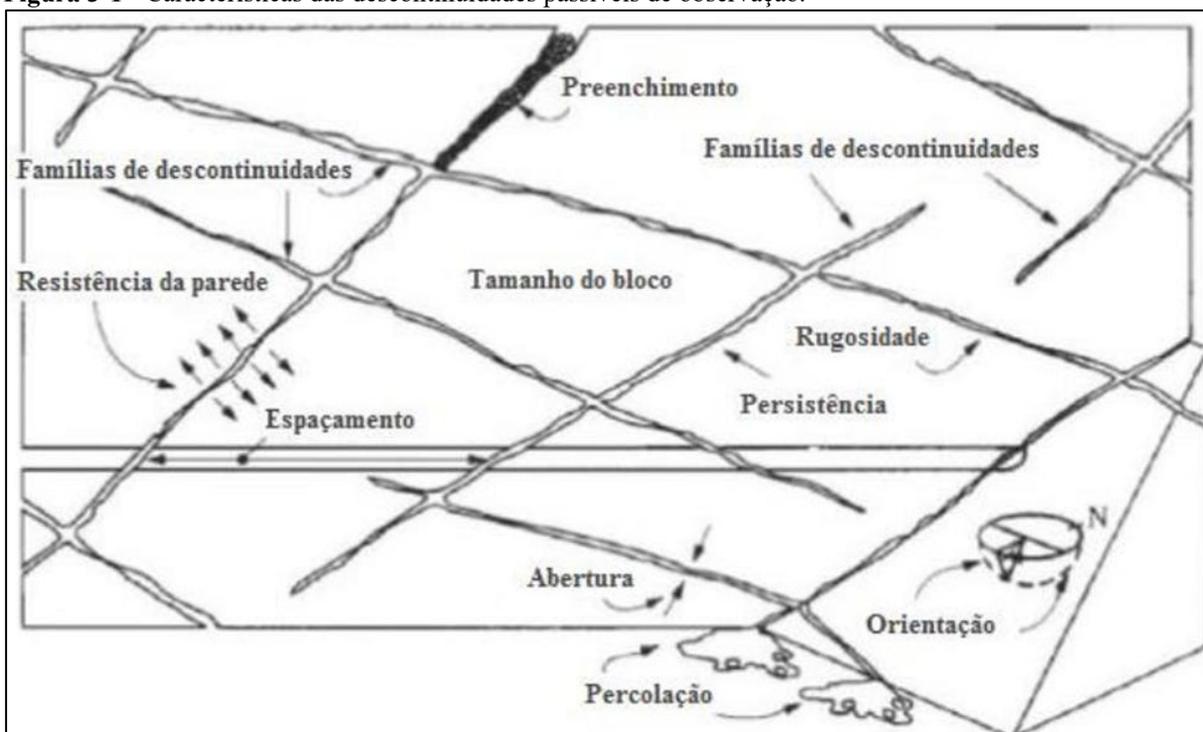
A rocha é caracterizada como um material sólido natural consolidado, formado por agregados minerais resultantes de processos geológicos. O maciço rochoso é formado por blocos de rochas ou rochas intactas delimitados por planos de fraquezas, conforme a definição de (Mesquita, 2008).

Tanto o maciço rochoso quanto suas descontinuidades se comportam de formas distintas em relação ao tipo de construção incorporado a sua estrutura. Sendo assim, a depender de cada tipo de projeto, suas dimensões e características, esse corpo deve ser estudado em sua totalidade a fim de compreender como o maciço rochoso e uma obra se comportarão em conjunto (Vallejo *et al.*, 2002).

De acordo com a *International Society of Rock Mechanics* (ISRM) (Ulusay; Hudson, 2007) os diversos tipos de descontinuidades (falhas, clivagem, plano de acamamento, etc.)

podem ser caracterizados a partir dos parâmetros de orientação, persistência, rugosidade, espaçamento, resistência das paredes, abertura, preenchimento e percolação de água. Já o maciço rochoso como um todo pode ser descrito pelo número de famílias de descontinuidades e tamanho dos blocos de rocha intacta, como como representado na Figura 3-1 (Mesquita, 2008).

Figura 3-1 - Características das descontinuidades passíveis de observação.



Fonte: adaptado de ISRM (2007).

A seguir, será apresentada uma visão geral dos principais métodos utilizados na literatura para descrever maciços rochosos.

3.1.1 Classificação RQD (Rock Quality Designation)

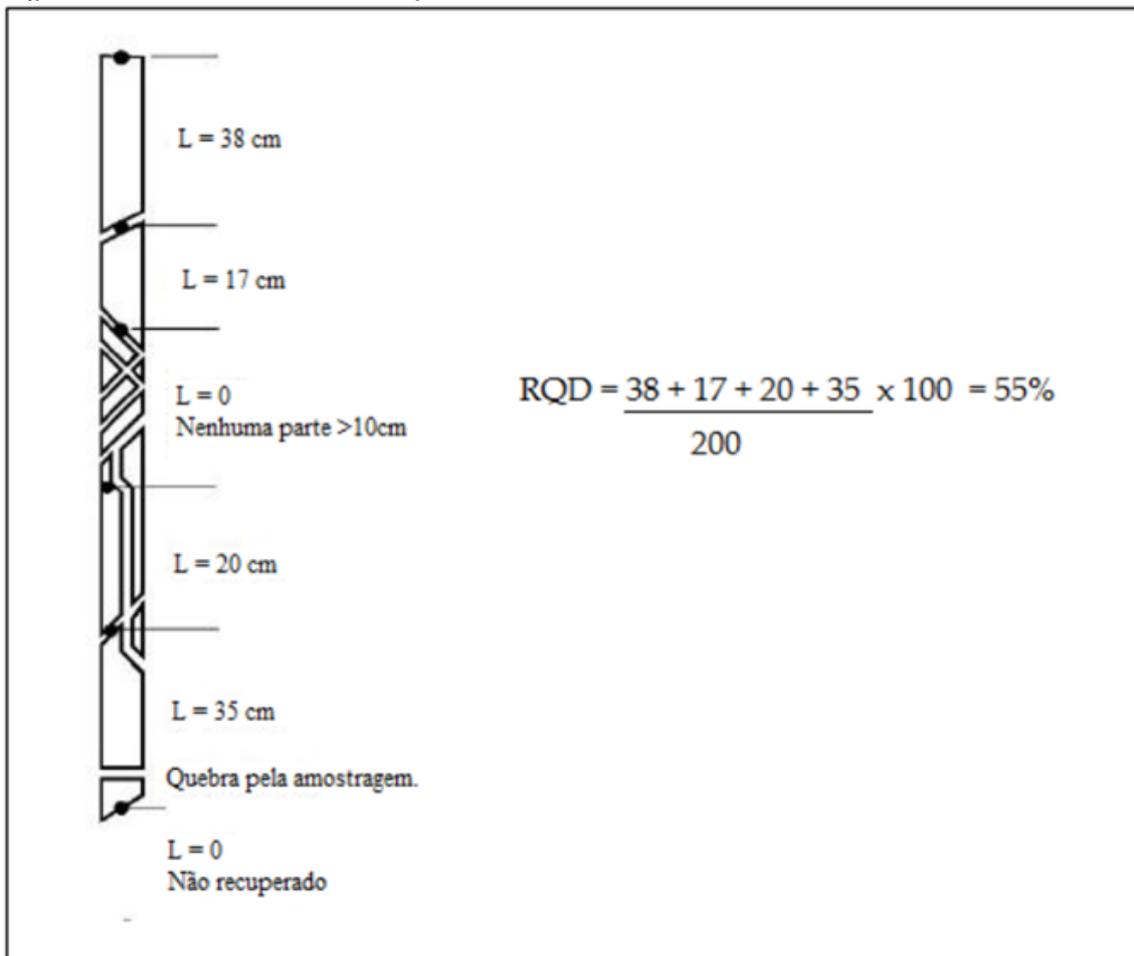
O primeiro índice quantitativo para descrever a qualidade de um maciço rochoso foi proposto por Deere em 1964, denominado *Rock Quality Designation* (RQD). Originalmente concebido como um sistema de classificação para a construção de túneis e a estimativa de suportes, esse sistema evoluiu para se tornar um parâmetro padrão adotado por diversas outras classificações mais modernas (Paz *et al.*, 2015)

O método leva em consideração a porcentagem de rocha “íntacta” recuperada de testemunhos de sondagem rotativa. Calcula-se o RQD a partir da razão da soma dos comprimentos do testemunho maiores de 10 cm pelo comprimento total do testemunho

(Equação 3.1). O cálculo desconsidera as fraturas mecânicas causadas artificialmente pela sondagem. A obtenção desse índice é ilustrada no procedimento representado pela Figura 3-2.

$$RQD = \sum \frac{\text{partes do testemunho} > 10\text{cm}}{\text{comprimento total do testemunho}} \times 100 \quad (\text{Equação 3.1})$$

Figura 3-2 - Método de cálculo de RQD.



Fonte: modificado de Deere e Deere (1989).

Após realizar o cálculo do índice, torna-se viável classificar a rocha em uma das cinco categorias, conforme apresentado no Quadro 3.1. Porém, ao conhecer os diversos fatores que afetam a qualidade de um maciço rochoso, classificá-lo utilizando apenas o RQD, a classificação obtida não é representativa do maciço estudado. Dessa forma, é aconselhável o uso de outro método em conjunto para uma caracterização mais abrangente do maciço (Hoek; Kaiser; Bawden, 1995).

Quadro 3.1 - Qualidade do maciço rochoso a partir do índice RQD.

RQD (%)	DESCRIÇÃO	CLASSE
0 – 25	A – Muito podre	I
25 – 50	B – Podre	II
50 – 75	C - Regular	III
75 – 90	D – Bom	IV
90 – 100	E - Excelente	V

Fonte: adaptado de Deere e Deere (1989).

3.1.2 Classificação RMR (*Rock Mass Rating*)

Desenvolvido por Bieniawski em 1973 e complementado em 1989, o sistema RMR classifica geomecanicamente um maciço rochoso e pressupõe o seu zonamento. A definição das zonas se dá a partir das observações litológicas, estruturais ou o grau de alteração do maciço (Freitas, 2011). A classificação leva em consideração seis parâmetros tidos como os critérios mais relevantes na avaliação do comportamento de um maciço rochoso, que são:

- RQD (Índice de qualidade da rocha);
- Resistência a compressão uniaxial da rocha intacta ou índice de compressão puntiforme;
- Espaçamento das descontinuidades;
- Condições das descontinuidades;
- Ação de águas subterrâneas.
- Orientação das descontinuidades;

O Quadro 3.2 expõe os valores de cada parâmetro para o cálculo do índice RMR e classificação do maciço rochoso.

Para uma classificação mais precisa, o maciço deve ser segmentado em setores com propriedades geológicas semelhantes, levando em consideração tanto a litologia quanto as famílias de descontinuidades. No entanto, mesmo dentro desses setores, podem ocorrer variações nos padrões de fraturamento dentro de uma mesma litologia, o que pode exigir uma subdivisão ainda mais detalhada em grupos menores com características homogêneas (Hoek; Kaiser; Bawden, 1995).

Quadro 3.2 - Parâmetros e pontuações da classificação RMR.

PARÂMETROS DE CLASSIFICAÇÃO									
1	Resistência do material rochoso intacto	Resistência à compressão uniaxial (MPa)	>250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	5 - 25	1 - 5	<1
		Pesos	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD	(%)	90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	<25		
		Pesos	20	17	13	8	3		
3	Descontinuidades (m)	Pesos	>2	0,6 - 2	0,2 - 0,6	0,06 - 2	<0,06		
			20	15	10	8	5		
4	Condições das descontinuidades	Comprimento descontinuidade (m)	<1	1 - 3	3 - 10	10 - 20	>20		
		Pesos	6	4	2	1	0		
		Abertura (mm)	Nenhuma	<0,1	0,1 - 1	1 - 5	>5		
		Pesos	6	5	4	1	0		
		Rugosidade	Muito rugosa	Rugosa	Ligeiramente rugosa	Ondulada	Suave		
		Pesos	6	5	3	1	0		

PARÂMETROS DE CLASSIFICAÇÃO							
		Preenchimento (mm)	Nenhuma	Duro <5	Duro >5	Mole <5	Mole >5
		Pesos	6	4	2	2	0
		Meteorização	Inalterada	Ligeiramente alterada	Moderadamente alterada	Muito alterada	Decomposta
		Pesos	6	5	3	1	0
5	Presença de água	Condições gerais do maciço	Seco	Ligeiramente úmido	Úmido	Escorrimentos	Fluxo abundante
		Pesos	15	10	7	4	0
6	Para túneis e minas	Orientação da descontinuidade	Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável
		Pesos	0	-2	-5	-10	-12

Fonte: modificado de Bieniawski (1989).

3.1.3 Classificação GSI (*Geological Strength Index*)

O método de classificação de maciços rochosos heterogêneos proposto por Marinos, Marinos e Hoek (2005) é uma adaptação do *Geological Strength Index* (GSI) tradicional, desenvolvido inicialmente por Hoek (1995), voltada especificamente para rochas muito fraturadas, anisotrópicas e com elevado grau de alteração, como xistos, filitos e maciços compostos por camadas intercaladas de diferentes resistências. Originalmente, o GSI foi concebido para maciços razoavelmente homogêneos, nos quais se aplicam os critérios convencionais de avaliação, como os apresentados na Figura 3-3. No entanto, essa abordagem não representa adequadamente maciços com estruturas geológicas mais complexas, como o acamamento ou o bandamento metamórfico, que frequentemente controlam o comportamento geomecânico do maciço.

Diante disso, o GSI modificado incorpora gráficos específicos que consideram tanto o grau de alteração do material matriz quanto a estrutura do maciço, possibilitando uma estimativa mais realista da qualidade geomecânica em situações onde o comportamento é fortemente condicionado pela heterogeneidade do material. Esses gráficos classificam os maciços em categorias como rochas intercaladas, foliadas/xistosas e rochas com matriz fraca contendo blocos mais competentes, permitindo uma avaliação mais conservadora e adequada das propriedades do maciço — especialmente útil em projetos geotécnicos envolvendo escavações em materiais brandos ou muito alterados. Para esses casos, foram utilizados os valores de GSI propostos por Marinos (2014), conforme indicado na Figura 3-4, sendo o índice determinado numericamente em cada ponto com base na qualidade do maciço e na classificação mais adequada ao seu tipo.

Adicionalmente, ressalta-se que, para maciços brandos (i.e., $\leq R2-$), o levantamento do GSI exige adaptações metodológicas. Conforme indicado por Cella *et al.* (2020), o GSI não é aplicável a maciços com resistência à compressão uniaxial (UCS) entre R0 e R1- (0,25 a 3 MPa). Para maciços com UCS entre R1+ e R2- (3 a 5 MPa), o levantamento pode ser realizado, desde que sejam feitas adaptações apropriadas. Estas, geralmente, consistem em considerar a descontinuidade dominante — preferencialmente o acamamento — como muito ruim, de modo a deprimir o valor do GSI em direção à direita e para baixo nas tabelas de referência. Assim, os valores esperados de GSI situam-se entre 0 e 20 para maciços R1+ e entre 20 e 35 para maciços

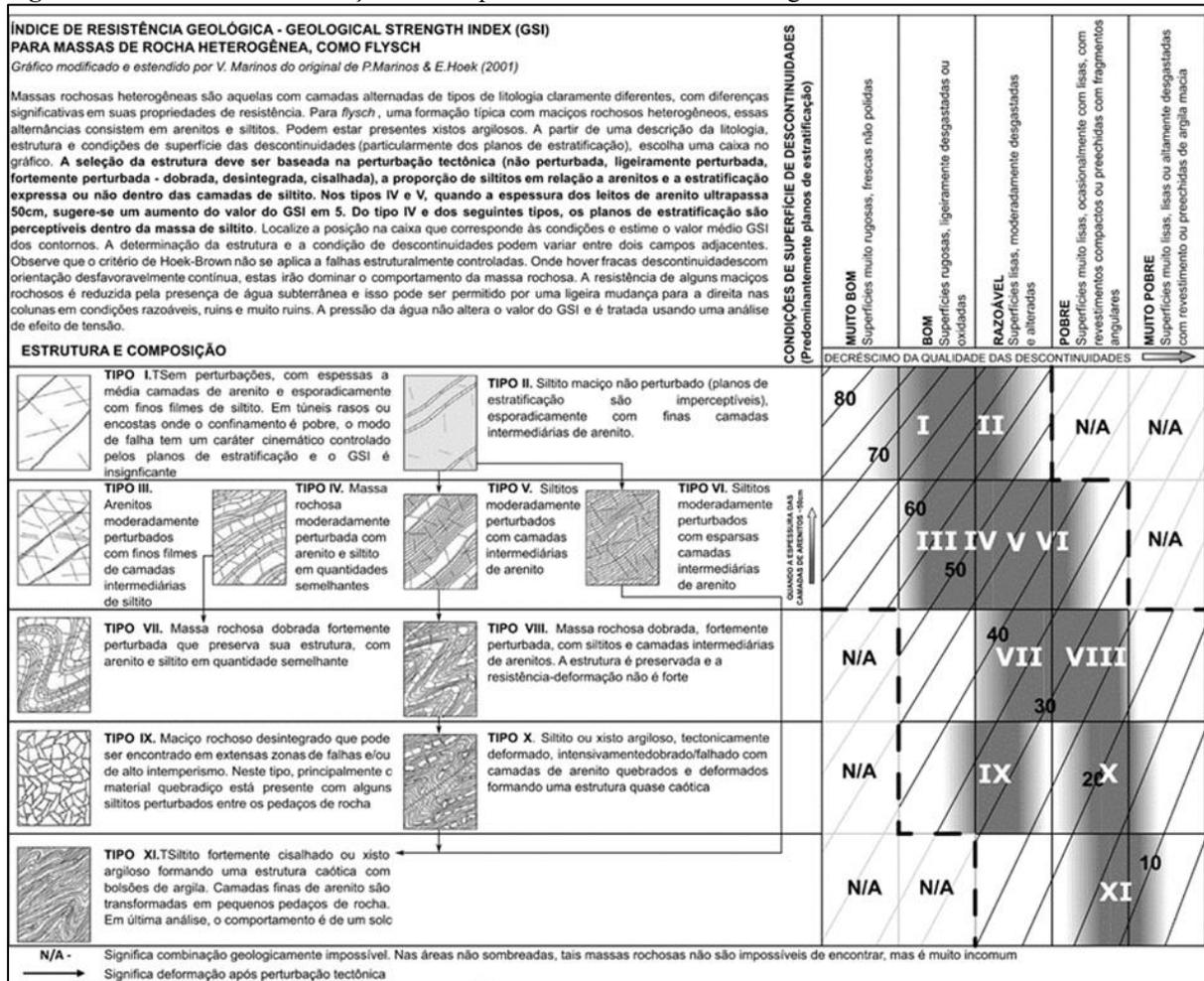
R2-, refletindo de maneira mais conservadora a qualidade do maciço (Cella; Castro; Carter, 2020).

Figura 3-3 - Critérios de classificação geomecânica baseada no GSI.

<p style="text-align: center;">GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCK MASSES</p> <p>From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.</p>		<p style="text-align: center;">SURFACE CONDITIONS</p> <p style="text-align: center;"> VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces POOR Slack-sided highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments VERY POOR Slack-sided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings </p>				
<p style="text-align: center;">STRUCTURE</p>		<p>DECREASING SURFACE QUALITY ⇒</p>				
	<p>INTACT OR MASSIVE Intact rock specimens or massive <i>in situ</i> rock with few widely spaced discontinuities.</p>	90			N/A	N/A
	<p>BLOCKY Well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three orthogonal discontinuity sets.</p>	80				
	<p>VERY BLOCKY Interlocked partially disturbed rock mass with multifaceted angular blocks formed by 4 or more discontinuity sets.</p>	70				
	<p>BLOCKY/DISTURBED/SEAMY Folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity.</p>	60				
	<p>DISINTEGRATED Poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces</p>	50				
	<p>LAMINATED/SHEARED Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes.</p>	40				
		30				
		20				
		10				
		N/A	N/A			

Fonte: adaptado de Marinis & Hoek (2005).

Figura 3-4 - Ábaco de classificação do GSI para massas de rochas heterogêneas.



Fonte: Marinos (2014).

3.1.4 Classificação *Weak Rock*

O termo *weak rocks* (rochas brandas), conforme definido pela Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (*International Society of Rock Mechanics* - ISRM, 1981), abrange massas rochosas cujas resistências intactas variam de muito fraca (R0) a fraca (R2). Essas rochas possuem resistências à compressão uniaxial (UCS) entre 250 kPa e 25 MPa. Em 2019, Cella *et al.* propôs subdivisões adicionais para as classes R1 e R2, especialmente para materiais com resistências UCS variando de 1 MPa a 15 MPa, pois esses materiais estão no limiar entre o comportamento de um solo rígido/duro e o de uma rocha.

Rochas fracas são consideradas um estágio intermediário entre solos rígidos e rochas duras. Dependendo de sua composição mineral, algumas podem se degradar em semanas ou anos quando expostas a variações no teor de umidade, resultando em perda irreversível de resistência. Em contraste, muitos solos podem recuperar sua resistência em curto prazo com

alterações no teor de água ou na carga aplicada (Cella; Castro; Carter, 2020; Cella; Almeida; Castro, 2019).

Em rochas fracas, colapsos podem ocorrer mesmo sem a presença de estruturas geológicas dominantes, que, quando presentes, podem influenciar o padrão de ruptura, mas raramente são o principal fator. As falhas tendem a ser circulares ou planares, enquanto rupturas em cunha e tombamentos são menos frequentes. A presença aleatória dessas estruturas pode complicar a investigação de campo. As rupturas em escavações de rochas fracas podem variar entre comportamentos típicos de solos rígidos e falhas parcialmente influenciadas por estruturas geológicas (Stacey e Martin, 2018).

O Quadro 3.3 apresenta a avaliação da resistência da massa rochosa realizada em campo, destacando suas características típicas, assim como o perfil geológico correspondente. Em seguida, o Quadro 3.5 ilustra as faixas de graus de resistência, para a classificação de maciços brandos, propostas por Cella *et al.* em 2019, detalhando os critérios a serem observados na descrição do material rochoso, além de comparar os sistemas de classificação anteriormente aplicados para determinados intervalos de resistência UCS.

Quadro 3.3 - Descrição das classes R0 a R2+ segundo a classificação *Weak Rock*.

Avaliação de campo da resistência da massa de rocha	Grau de intemperismo ou Classificação UCS (MPa)	Resistência ou comportamento da massa de rocha	Perfil típico de intemperismo
R0	W6 – 0,25 a 1	A resistência do solo e seu comportamento variam com a distribuição do tamanho dos grãos e a plasticidade da rocha hospedeira.	Solo residual.
R1-	W5 – 1 a 3	Comportamento de solo duro, controlado pela resistência do material intacto.	Solo residual saprolítico.
R1+	W5/W4 – 3 a 5	Transição do comportamento de solo para massa rochosa. Resistência do material intacto domina em grande escala e fortemente afetado pela foliação.	Saprólito
R2-	W4 – 5 a 10	Transição do comportamento de solo para o de massa rochosa. Resistência da massa rochosa em transição de rocha intacta para massa rochosa, com os planos de foliação e/ou estratificação criando anisotropia de resistência.	Saprólito resistente/ <i>Saprock</i> .
R2+	W4/W3 - >10 a 25	Comportamento de massa rochosa. A resistência da massa rochosa é resultado de uma combinação de resistência de rocha intacta, tamanho de bloco e resistência ao cisalhamento interbloco.	<i>Saprock</i>

Fonte: adaptado de Cella *et al.* (2019).

Quadro 3.4 - Faixas de graus de resistência, para a classificação de maciços brandos, propostas por Cella *et. al* (2019).

ÍNDICE DE RESISTÊNCIA ²	DESCRIÇÃO	Rc (Mpa)	I.S. (Mpa)	AVALIAÇÃO DE CAMPO						
				(1) Martelo	(2) Risco canivete ¹	(3) Queda canivete	(4) Raspagem canivete ¹	(5) Risco unha	(6) Pressão manual	
R6	Extremamente resistente	>250	>10	Lascada	-	-	-	-	-	
R5	Muito resistente	100-250	4-10	Quebra com dificuldade com vários golpes	-	-	-	-	-	
R4	Resistente	50-100	2-4	Quebra com vários golpes	Risco superficial	-	-	-	-	RMR 2011
R3	Medianamente resistente	25-50	1-2	Quebra com dificuldade com um golpe		Ponto pequeno	Com muita dificuldade	-	-	
R2	R2+	Pouco resistente	10-25	Quebra com um golpe	Risca	Ponto grande	Com dificuldade	-	-	
	R2-	Branda	5-10				Produz pó	Risco superficial	-	
R1	R1+	Muito branda superior	3-5	Fragmenta com um golpe	Risca fundo		Com facilidade produz muito pó	Risca	Quebra pontualmente	<i>Weak</i>
	R1-	Muito branda inferior	1-3	Desagrega	Corta (separa)	Penetra	Descasca, entalha	Penetra	Quebra as bordas	<i>Very weak</i>

ÍNDICE DE RESISTÊNCIA ²	DESCRIÇÃO	Rc (Mpa)	I.S. (Mpa)	AVALIAÇÃO DE CAMPO						
				(1) Martelo	(2) Risco canivete ¹	(3) Queda canivete	(4) Raspagem canivete ¹	(5) Risco unha	(6) Pressão manual	
R0	Extremamente branda	0.25-1	-	-	-	Penetra	-	Corta	Desagrega	<i>Extremely weak</i>

- (1) Reação ao golpe do martelo de geólogo;
 (2) Reação ao risco com a ponta do canivete;
 (3) Reação à queda da ponta do canivete;
 (4) Reação à raspagem do canivete na borda da amostra
 (5) Reação ao risco com unha
 (6) Reação à pressão dos dedos

¹ A resposta à utilização do martelo e em amostras muito ricas em minerais lamelares é mais significativa que do canivete.

² Referências típicas: R0 – R1⁺ (saprólitos); R1⁺ (tijolo); R2⁻ (solo-cimento); R2⁺ (concreto comum); R3 (concreto especial);

Fonte: Cella *et al.* (2019).

3.1.5 Ensaio de Compressão Uniaxial

O teste de compressão uniaxial (UCS) é frequentemente empregado na avaliação dos parâmetros geomecânicos das rochas, destacando-se pela simplicidade e rapidez na aquisição de dados. Esse teste visa a caracterização e a classificação do material rochoso, levando em consideração sua capacidade de resistência (Hoek, 2007; ISRM, 1979). Conforme Brown (1981), é possível classificar as rochas em diferentes níveis de resistência através de ensaios empíricos e de compressão uniaxial (Quadro 3.5).

Quadro 3.5 - Estimativas de resistência à compressão uniaxial e de carga pontual.

Grau	Designação	(MPa)	Análise
R6	Extremamente resistente	>250	A rocha lasca depois de sucessivos golpes de martelo e ressoa quando é atingida
R5	Muito resistente	100 a 250	Requer muitos golpes de martelo para partir em pedaços de rocha
R4	Resistente	50 a 100	Pedaços pequenos de rocha seguros com a mão são partidos com um único golpe de martelo
R3	Medianamente Resistente	25 a 50	Um golpe firme com a ponta do martelo de geólogo faz sulcos de até 5 mm; o canivete consegue raspar a superfície da rocha
R2	Branda	5 a 25	Canivete corta a amostra, mas não a molda
R1	Muito branda	1 a 5	Esmigalha-se com o impacto da ponta do martelo, pode ser raspado com canivete
R0	Extremamente branda	0,25 a 1	Pode ser marcado com a unha

Fonte: Brown (1981).

No contexto brasileiro, a norma ABNT NBR 15845-5/2015 normatiza a realização do teste de compressão uniaxial. Durante o procedimento, utiliza-se como amostras os testemunhos obtidos de perfurações, que são essenciais na caracterização de maciços rochosos. Esses testemunhos são preparados em forma de cilindros que representam o litotipo em estudo. A metodologia envolve a aplicação de uma carga progressiva na amostra por meio de uma prensa hidráulica, até que ocorra a falha do material.

Os resultados obtidos permitem uma avaliação mais acurada da capacidade de carga e do ponto de falha do maciço rochoso. Tais informações são cruciais para o planejamento de instalações de obras de engenharia e para a realização de simulações computacionais de ruptura em maciços rochosos. Adicionalmente, os dados podem ser utilizados para definir índices geomecânicos, como o RMR (*Rock Mass Rating*), que são fundamentais na caracterização geotécnica.

3.1.6 Ensaio de Compressão Triaxial

O ensaio de compressão triaxial é amplamente utilizado para avaliar as propriedades mecânicas dos solos, simulando as condições reais em que o solo está submetido a esforços em múltiplas direções, como as tensões provocadas por edificações, escavações e aterros. Esse teste permite compreender o comportamento do solo sob cargas complexas, analisando suas capacidades de resistência e deformabilidade em condições controladas, onde as tensões são aplicadas tridimensionalmente (Das e Sobhan, 2021; Santos, 2017).

O equipamento usado no ensaio consiste em uma câmara de pressão que abriga uma amostra cilíndrica de solo envolvida por uma membrana de borracha. Durante o teste, a amostra é submetida a duas tensões principais: uma pressão confinante, aplicada uniformemente em todas as direções para simular as pressões no solo natural, e uma pressão axial, aplicada verticalmente, que reproduz o peso de uma estrutura ou outras cargas. Durante o processo, são medidas a deformação, a variação de volume (em solos saturados) e a tensão que a amostra suporta até o rompimento ou até atingir um estado de equilíbrio, fornecendo dados essenciais sobre a capacidade do solo de suportar cargas (Das e Sobhan, 2021; Santos, 2017).

Os ensaios triaxiais podem ser classificados em três tipos principais, dependendo das condições de drenagem e consolidação do solo. No ensaio não drenado (UU), o solo é submetido a tensões sem permitir a drenagem da água dos poros, simulando situações rápidas, como deslizamentos ou cargas súbitas (ASTM International, 2020b). No ensaio drenado (CD), a amostra é consolidada e a água dos poros pode drenar durante todo o processo, representando condições de longo prazo, onde as pressões da água nos poros se dissipam lentamente (ASTM International, 2020a). Já no ensaio consolidado-não drenado (CU), o solo é consolidado, mas a drenagem é impedida durante a aplicação da carga axial, útil em casos intermediários, como o carregamento de solos saturados com drenagem limitada (ASTM International, 2023).

3.1.7 Ensaio esclerométrico

O teste esclerométrico avalia as propriedades mecânicas de maciços rochosos por meio de parâmetros como dureza, resistência à compressão, homogeneidade do material, identificação de fraturas e índice de *rebound*. A dureza mede a resistência da rocha à penetração e ajuda a classificar materiais para construção e exploração mineral. Embora a resistência à compressão não seja medida diretamente, pode ser correlacionada com a dureza, sendo crucial para avaliar a capacidade de suporte de fundações. O teste também revela variações de dureza que indicam fragilidades, essenciais na análise de estabilidade de taludes, e ajuda a detectar fraturas que podem representar riscos em escavações. Esses parâmetros são utilizados em exploração mineral, projetos de construção, avaliação de taludes e manutenção de infraestruturas, garantindo segurança e viabilidade em obras envolvendo rochas (Das e Sobhan, 2021).

3.1.8 Mapeamento geomecânico

O mapeamento geomecânico é uma técnica que utiliza mapas para representar informações geológico-geotécnicas. Essa abordagem desempenha um papel crucial no planejamento e gestão do território, assim como nos processos de projeto, construção e manutenção de estruturas (Vallejo *et al.*, 2002).

O mapeamento geomecânico possui como objetivo principal a identificação das principais estruturas geotécnicas que definem a qualidade do maciço rochoso, uma vez que a estabilidade e a deformabilidade de um maciço rochoso são fortemente influenciadas pela presença e características das discontinuidades (Renó; Gontijo; Herrera, 2014).

Renó *et al.* (2014) salientam que um mapeamento eficiente não se limita apenas à coleta de dados sobre a orientação das estruturas, mas sim à identificação abrangente e diversificada de todas as características da escavação. A determinação adequada da escala de trabalho deve considerar fatores como as dimensões da cava, a persistência das estruturas, a variação na qualidade do maciço, entre outros. Os dados obtidos desempenharão um papel crucial na avaliação do comportamento do maciço rochoso, além de permitir a previsão de potenciais problemas geotécnicos que podem surgir durante a execução do projeto (Vallejo *et al.*, 2002).

3.2 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES

A análise de estabilidade de taludes envolve várias etapas fundamentais. Primeiramente, é obtida a planta planialtimétrica da área de estudo, essencial para a compreensão da topografia e da geometria do talude. Em seguida, realiza-se o levantamento do perfil geológico-geotécnico, identificando as camadas de solo e rocha, além de suas propriedades. O monitoramento do nível d'água também é essencial, pois influencia diretamente as condições de estabilidade (Duncan; Wright; Brandon, 2014). A análise cinemática é então conduzida, verificando os possíveis tipos de rupturas (planar, cunha, rotacional, entre outras) com base nas características do material e das discontinuidades. As propriedades físicas (densidade, permeabilidade) e de resistência (coesão, ângulo de atrito) das camadas são determinadas por ensaios laboratoriais ou de campo. Com esses dados, é feita a configuração do software de análise, inserindo as informações geométricas, hidrológicas e geotécnicas para calcular os fatores de segurança e prever possíveis rupturas no talude (Gerscovich, 2021; Hoek e Bray, 2001).

Após o processo de modelagem e inserção de dados no software de análise de estabilidade de taludes, obtêm-se os resultados, como o fator de segurança, que indica a relação entre forças estabilizantes e desestabilizantes. Esses resultados são analisados e comparados com os critérios estabelecidos nas normas técnicas específicas para cada tipo de obra, como barragens, rodovias ou encostas urbanas. As normas, como a ABNT NBR 11682/2008 no Brasil, fornecem parâmetros mínimos de segurança que devem ser atendidos. Caso o fator de segurança calculado esteja abaixo do exigido, podem ser necessárias intervenções, como o reforço estrutural, drenagem ou reprojetado do talude, visando garantir a segurança e estabilidade da obra.

3.2.1 Análise cinemática

Análise cinemática é o estudo do movimento de corpos, sem considerar as forças que o causam. Na avaliação da estabilidade de taludes, a análise cinemática é uma ferramenta preliminar que identifica os potenciais mecanismos de ruptura com base no comportamento geométrico das discontinuidades (Santos, 2017).

Ao realizar uma análise cinemática, é possível antecipar a estabilidade inerente a um bloco ou talude, considerando suas relações angulares. Utiliza-se a projeção hemisférica para estabelecer a relação entre a direção em que um bloco pode se mover e a orientação do talude (Wyllie; Mah, 2004). Dessa forma, a análise cinemática fornece uma boa indicação das

condições de estabilidade com base na geometria do talude e na atitude das discontinuidades, sem considerar as forças envolvidas ou fatores externos, como a presença de água em fraturas ou perturbações causadas por agentes externos, como vibrações no maciço. No entanto, é importante destacar que a análise cinemática por meio da projeção hemisférica não está isenta de limitações (Santos, 2017).

3.2.2 Propriedades físicas e propriedades de resistência dos materiais

Na análise de estabilidade de taludes, as propriedades físicas e de resistência dos solos e rochas são essenciais para prever o comportamento das encostas. Propriedades físicas, como densidade, porosidade e permeabilidade, influenciam a resposta do material à água e à gravidade. Já as propriedades de resistência, como coesão e ângulo de atrito interno, determinam a capacidade do solo ou rocha de resistir ao deslizamento. A interação dessas propriedades é analisada para avaliar riscos e planejar medidas de estabilização em taludes (Assis, 2013).

A obtenção dos dados de coesão e ângulo de atrito interno são obtidas a partir de ensaios laboratoriais, sendo os métodos mais comuns para a determinação desses parâmetros são o ensaio de compressão uniaxial e o ensaio de compressão triaxial (Santos, 2017).

3.2.2.1 Critério de ruptura de Mohr-Coulomb

O critério de ruptura de Mohr-Coulomb é amplamente utilizado em geotecnia, mecânica dos solos e rochas, bem como na engenharia estrutural para descrever o comportamento de materiais frágeis, como solos, rochas e concretos, sob tensões (Caputo, 2011). Ele se baseia na ideia de que a ruptura ocorre quando a tensão de cisalhamento máxima no material atinge um valor crítico, que é função da tensão normal, como é demonstrado na Equação 3.2.

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan(\varphi) \quad (\text{Equação 3.2})$$

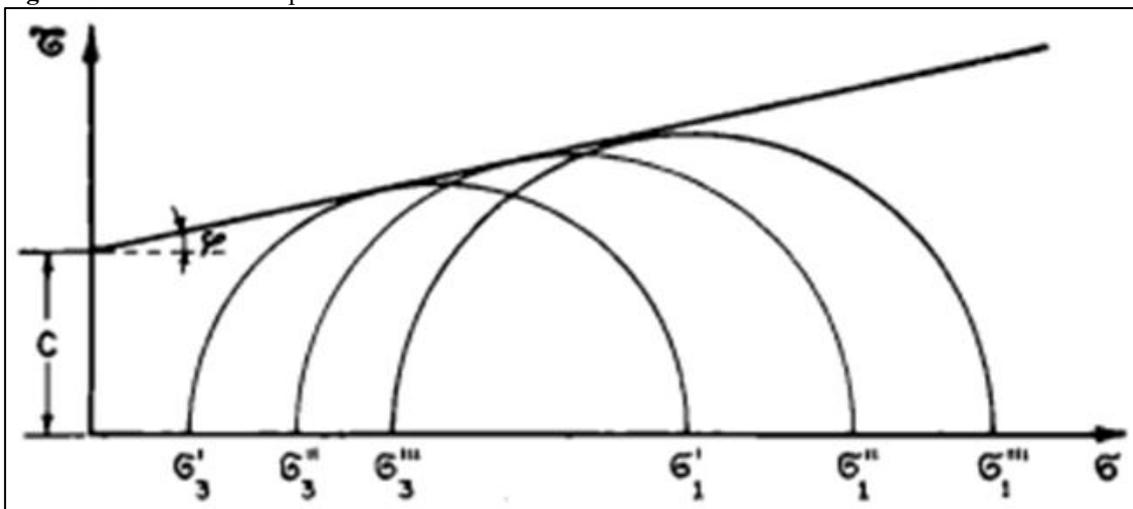
Onde:

- τ é a tensão de cisalhamento no plano de ruptura;
- c é a coesão do material, ou seja, a resistência ao cisalhamento quando não há tensão normal aplicada ($\sigma=0$);
- σ é a tensão normal no plano de ruptura;

- φ é o ângulo de atrito interno do material.

Esse critério relaciona a tensão de cisalhamento do material com a tensão normal, afirmando que a ruptura ocorre quando a tensão de cisalhamento ultrapassa o valor limite estabelecido pela equação. Para isso, são determinados pares de tensões (σ_1 e σ_3) correspondentes à ruptura das diversas amostras testadas, e a partir deles, são traçados os círculos de Mohr. Em seguida, ao associar a envoltória desses círculos à reta de Coulomb, é possível obter os valores de c e φ , conforme ilustrado na Figura 3-5 (Caputo, 2011).

Figura 3-5 - Critério de ruptura de Mohr-Coulomb.



Fonte: Caputo (2011).

3.2.3 Análise de bancada (Via Equilíbrio Limite)

A avaliação da análise de estabilidade via equilíbrio limite em nível de bancada e interrampas é realizada para identificar os mecanismos de ruptura mais prováveis, considerando três tipos: cunha, planar e tombamento. Para isso, são utilizados os critérios de Priest e Brown (1983), que definem que a probabilidade de ocorrência de um mecanismo de ruptura deve ser superior a 10%.

O método do equilíbrio limite baseia-se na avaliação matemática do equilíbrio entre as forças cisalhantes e as forças de resistência ao cisalhamento atuantes no talude (Duncan; Wright; Brandon, 2014; Hoek; Bray, 2001). As análises consideram as propriedades das discontinuidades — como orientação, espaçamento, persistência, rugosidade e abertura —, bem como o volume de material mobilizado durante a ruptura (Wyllie e Mah, 2004). A integração dessas informações permite a estimativa do fator de segurança para diferentes modos de ruptura, orientando o projeto e a estabilidade de escavações e encostas.

3.2.4 Análise de estabilidade global (Via Equilíbrio Limite)

Para avaliar a estabilidade global de um talude, as análises de equilíbrio limite são realizadas em ambiente 2D, a partir do posicionamento de seções geológico-geotécnicas em zonas potencialmente críticas. Essas zonas são definidas com base na geometria do talude, no modelo geomecânico da estrutura, nas características e orientações das descontinuidades que compõem o maciço rochoso e nos aspectos hidrogeológicos da cava, como o nível freático. As análises de equilíbrio limite avaliam matematicamente o equilíbrio entre as forças cisalhantes e as forças de resistência ao cisalhamento em escala de talude global (Fiori, 2015; Gerscovich, 2021).

3.2.5 Métodos de análise

A seguir, são apresentados dois dos principais métodos de análise de estabilidade de taludes utilizados na engenharia geotécnica: os métodos de Spencer (1967) e de Morgenstern-Price (1965). Ambos se baseiam no equilíbrio limite e são amplamente empregados por sua precisão e confiabilidade na avaliação do fator de segurança em taludes com diferentes condições geotécnicas.

3.2.5.1 Spencer

O método de análise de estabilidade de taludes desenvolvido por Spencer (1967) é considerado um dos mais completos entre os métodos de equilíbrio limite. Seu objetivo é estimar o fator de segurança (FoS) do talude, levando em conta, de forma simultânea, o equilíbrio das forças e dos momentos atuantes. Para isso, o talude é dividido em fatias verticais, ao longo de uma superfície de ruptura que pode ser circular ou com outra geometria qualquer. Diferente de abordagens mais simplificadas, como as propostas por Fellenius (1936) ou Bishop (1955), o método de Spencer considera também as forças que atuam entre as fatias, assumindo que todas possuem a mesma inclinação em relação à horizontal.

A principal vantagem dessa abordagem é que ela atende rigorosamente às três condições de equilíbrio estático: forças verticais, forças horizontais e momentos (Fredlund e Krahn, 1977). Isso faz com que o método seja especialmente indicado para análises em taludes com geometrias complexas, presença de carregamentos adicionais, variação nas propriedades dos materiais ou influência significativa da pressão neutra. O fator de segurança, nesse caso, é

definido como a razão entre a resistência ao cisalhamento disponível ao longo da superfície de ruptura e a tensão mobilizada pelas forças atuantes. Como tanto o valor do FoS quanto a inclinação comum das forças entre fatias são dependentes um do outro, a solução do problema exige iterações, geralmente realizadas com o auxílio de *softwares* específicos (Duncan; Wright; Brandon, 2014).

Apesar de exigir maior esforço computacional, o método de Spencer é amplamente reconhecido pela sua confiabilidade, sendo utilizado como referência na validação de outros métodos e no dimensionamento seguro de obras geotécnicas, como encostas, taludes escavados, cortes em rocha e barragens (Abramson, 2002).

3.2.5.2 GLE / Morgenstern-Price

O método de equilíbrio limite geral, conhecido como método GLE ou Morgenstern-Price, foi desenvolvido por Morgenstern e Price em 1965 e é atualmente uma das abordagens mais completas e rigorosas para análise de estabilidade de taludes. Assim como em outros métodos dessa classe, o talude é subdividido em fatias verticais, ao longo de uma superfície de ruptura previamente definida, podendo esta ser circular ou de geometria arbitrária. O diferencial do método está na consideração simultânea do equilíbrio de forças horizontais, verticais e de momentos, incorporando também as forças que atuam entre as fatias, conhecidas como forças entre fatias (Morgenstern e Price, 1965).

O método permite ao engenheiro definir uma função de distribuição das forças interslice, chamada de função de inclinação, que descreve como essas forças variam ao longo da superfície de ruptura. Essa função pode assumir formas diversas — constante, linear, trapezoidal, senoidal, entre outras — e, embora a escolha tenha algum impacto na solução, resultados consistentes costumam ser obtidos desde que a função represente adequadamente o comportamento esperado do talude. A solução do problema é alcançada de forma iterativa, uma vez que o fator de segurança depende diretamente do equilíbrio entre essas forças e momentos, e está envolvido nas equações que definem o sistema (Duncan; Wright; Brandon, 2014).

Por tratar-se de um modelo geral, o método GLE engloba outros métodos como casos particulares — por exemplo, o método de Spencer (1967) pode ser obtido ao se assumir uma inclinação constante para as forças entre fatias. Sua principal vantagem está na robustez da solução, sendo especialmente indicado para casos mais complexos, como taludes com múltiplas

camadas de materiais, condições não drenadas, presença de lençol freático, carregamentos externos ou geometrias irregulares (Abramson, 2002; Duncan; Wright; Brandon, 2014). Por outro lado, devido à complexidade dos cálculos envolvidos, sua aplicação prática exige, na maioria dos casos, o uso de *softwares* especializados.

4 METODOLOGIA

O presente trabalho adotou uma abordagem metodológica estruturada em etapas sequenciais, com o objetivo de avaliar a estabilidade de nove taludes em uma mina a céu aberto, por meio de análises geológico-geotécnicas baseadas em dados secundários e em fundamentos teóricos consolidados.

Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica voltada para o entendimento da geologia regional e local da área de estudo, fornecendo o embasamento necessário para a caracterização do ambiente geológico. Em paralelo, foram revisados os principais métodos de classificação geomecânica utilizados em projetos de estabilidade de taludes, com ênfase nos sistemas RMR (*Rock Mass Rating*), GSI (*Geological Strength Index*), *Weak Rock*, entre outros, buscando compreender suas aplicações, limitações e critérios de escolha.

Na sequência, foram estudadas as bases teóricas relacionadas à análise cinemática de deslizamentos e aos métodos de análise de estabilidade via equilíbrio limite, visando estruturar a fundamentação técnica das análises a serem desenvolvidas.

Após essa etapa teórica, procedeu-se à análise dos dados secundários fornecidos pela projetista, os quais compreenderam: (i) levantamento geológico-geotécnico, (ii) avaliação geométrica da cava e (iii) avaliação litoestrutural da cava. Com esses dados, foi realizada a análise cinemática para identificação dos mecanismos potenciais de ruptura, considerando a orientação das descontinuidades em relação a orientação da face dos taludes.

Na sequência, foi realizada a compilação e interpretação dos ensaios laboratoriais de propriedades das rochas, com o intuito de obter parâmetros geomecânicos representativos das unidades litológicas envolvidas. Por fim, foi conduzida a análise de estabilidade dos taludes via método do equilíbrio limite, integrando os dados estruturais, geométricos e geotécnicos levantados ao longo do estudo.

4.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica concentrou-se em quatro eixos principais: a geologia regional e local da área da mina estudada, os métodos de classificação geomecânica de maciços rochosos, os fundamentos da análise cinemática e os métodos de análise de estabilidade de taludes, com o objetivo de fornecer o embasamento técnico necessário para o desenvolvimento do estudo.

Na etapa geológica, buscou-se compreender o contexto geotectônico regional, as unidades litológicas presentes e suas principais estruturas, além de levantar informações que ajudassem no entendimento do cenário geológico e geomecânico da cava.

Em relação à classificação geomecânica, foram revisados os principais sistemas utilizados em projetos de taludes em rocha, como o RMR, RQD, Weak Rock e GSI, que permitem avaliar a qualidade do maciço a partir de parâmetros estruturais, resistência e grau de alteração.

Para a análise cinemática, a revisão foi focada nos conceitos que permitem identificar os mecanismos potenciais de rupturas associados à orientação das descontinuidades em relação aos taludes, como ruptura planar e em cunha.

Por fim, foram estudados os métodos clássicos de análise de estabilidade via equilíbrio limite, com destaque para os métodos de Spencer (1967) e GLE/Morgenstern-Price (1965), que são amplamente utilizados em análises de estabilidade por permitirem a consideração de diferentes geometrias e condições geotécnicas.

4.2 ANÁLISE DOS DADOS RECEBIDOS

Os dados analisados neste trabalho são de natureza secundária e foram obtidos por meio de relatórios técnicos disponibilizados pela empresa projetista responsável pelo empreendimento, no contexto de uma parceria institucional com a autora deste trabalho. Esses dados foram coletados previamente durante a fase de mapeamento geológico-geotécnico da área de estudo, seguindo os procedimentos padrão da engenharia geotécnica. A metodologia adotada contempla os seguintes tópicos:

4.2.1 Levantamento geológico-geotécnico

O levantamento geológico-geotécnico teve como objetivo identificar as principais características geológicas e geotécnicas dos taludes da cava, incluindo o tipo de rocha, presença e orientação de fraturas, resistência dos materiais, descontinuidades estruturais e condições hidrogeológicas.

O mapeamento foi realizado diretamente nos taludes da cava e envolveu, de forma integrada, o levantamento estrutural, litológico e geomecânico. Durante essa etapa, foram

identificadas e medidas as descontinuidades presentes, como falhas, juntas e fraturas, utilizando bússola geológica e outros instrumentos de campo. Simultaneamente, foi feita a descrição litológica das unidades rochosas observadas, considerando aspectos como resistência, grau de alteração e textura das rochas.

A caracterização geomecânica foi realizada utilizando as metodologias RMR e *Weak Rocks*, com base na resistência à compressão uniaxial (UCS). Materiais com $UCS \leq 10$ MPa ($\leq R2-$) foram classificados como maciços brandos (analisados pelo método *Weak Rocks*), enquanto materiais com $UCS > 10$ MPa ($> R2+$) foram tratados como maciços resistentes (analisados pelo método RMR).

4.2.1.1 Maciços brando (*Weak rock*)

A classificação seguiu Cella et al. (2019) utilizando intervalos de UCS do proposto por BVP (2012). Foram avaliados parâmetros como granulometria, plasticidade, erodibilidade, anisotropia e saturação.

4.2.1.2 Maciços resistentes (RMR)

Foram caracterizados parâmetros da matriz rochosa (resistência e grau de intemperismo) e das descontinuidades (RQD, espaçamento, grau de fraturamento, número de famílias e saturação). O RQD foi obtido pela correlação com o índice de contador volumétrico (J_v), conforme (Palmstrom, 2005), utilizando a equação 4.1.

$$RQD = 110 - 2,5J_v \quad (\text{Equação 4.1})$$

(sendo $RQD = 0$ para $J_v > 35$ e $RQD = 100$ para $J_v < 4,5$).

Adicionalmente, foram avaliados parâmetros das descontinuidades propostos por Barton *et al.* (1974), como rugosidade (J_r) e alteração das paredes (J_a), mesmo sem aplicação direta na classificação RMR ou *Weak rock*.

4.2.1.3 Sistema GSI

O *Geological Strength Index* (GSI), proposto por Hoek (1995) e adaptado por Marinós e Hoek (2000), foi aplicado em maciços resistentes. Para estruturas complexas (ex.:

acamamentos ou bandamentos metamórficos), foram utilizados os critérios de Marinos (2017). Em maciços brandos, o GSI foi aplicado com adaptações:

- UCS entre 0,25 e 3 MPa (R0 a R1-): GSI não aplicável;
- UCS entre 3 e 10 MPa (R1+ a R2-): GSI entre 0 e 35, ajustado conforme descontinuidades.

4.2.2 Avaliação geométrica

A definição dos setores geométricos da cava foi baseada na direção de mergulho dos taludes, agrupando regiões com variação de direção de aproximadamente 20°. Utilizando geoprocessamento e análise estatística, foi gerado um mapa de orientação no QGIS 3.34.7 para delimitar os setores manualmente. Após análise estatística dos valores de direção, os setores foram ajustados, e os valores representativos de direção e mergulho foram definidos para cada setor, incluindo uma análise do ângulo de face para determinar o mergulho de cada um.

4.2.3 Avaliação litoestrutural

Foram considerados sete domínios estruturais, definidos a partir da interpretação do mapa de lineamentos. Esses domínios serviram de base para a compreensão da variação espacial das estruturas no contexto da cava atual. A delimitação foi feita, prioritariamente, com base no padrão de distribuição das estruturas e, secundariamente, na presença dos diferentes litotipos em cada área. Cada domínio reúne dados estruturais representativos — como xistosidade, foliação e as principais famílias de fraturas —, os quais subsidiaram as análises geométricas voltadas à avaliação das condições de estabilidade da cava. Para fins de análise, os domínios foram segmentados em setores, classificados conforme a direção dos taludes e o ângulo de face.

4.3 ANÁLISE CINEMÁTICA

A análise cinemática consiste em verificar a relação geométrica entre as descontinuidades ou conjuntos de descontinuidades que possam favorecer a ruptura em uma determinada geometria de talude. Para realizar essa avaliação, é necessário determinar:

- a direção e o ângulo de mergulho dos taludes avaliados;
- a direção e o ângulo de mergulho das descontinuidades;
- o tipo de ruptura esperado para a situação.

Para cada um desses itens, serão apresentados os critérios utilizados para definir os parâmetros de análise, seguidos pelos mecanismos de ruptura avaliados, com uma breve caracterização de suas formas de ocorrência.

4.3.1 Base teórica para as análises

A análise cinemática dos potenciais mecanismos de ruptura foi realizada utilizando o *software* Dips 6.0 da Rocscience, com o objetivo de avaliar o potencial cinemático e geométrico de ruptura nos diversos setores da cava. A ocorrência de rupturas do tipo planar, em cunha e tombamento estão condicionadas por fatores geométricos, conforme proposto por Hoek e Bray (1977). Os fatores geométricos são apresentados a seguir, conforme referência para os termos representados no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 - Representação dos elementos geométricos presentes na análise cinemática.

Símbolo	Representação
ψ	Mergulho
Φ	Ângulo de atrito
d	Descontinuidade
t	Talude

A seguir, serão descritas as condicionantes para a ocorrência de cada tipo de ruptura, como é demonstrado na Figura 4-1.

4.3.1.1 Ruptura planar

Para ocorrência cinemática de ruptura planar três condições têm de ser atendidas:

- A direção de mergulho da descontinuidade tem de estar paralela a direção de mergulho da descontinuidade, com uma aceitação lateral de mais ou menos 20°;
- O ângulo de mergulho da descontinuidade deve ser superior ou igual ao ângulo de atrito do material/litotipo;
- O mergulho da descontinuidade tem de ser menor que o mergulho do talude.

4.3.1.2 Ruptura em cunha

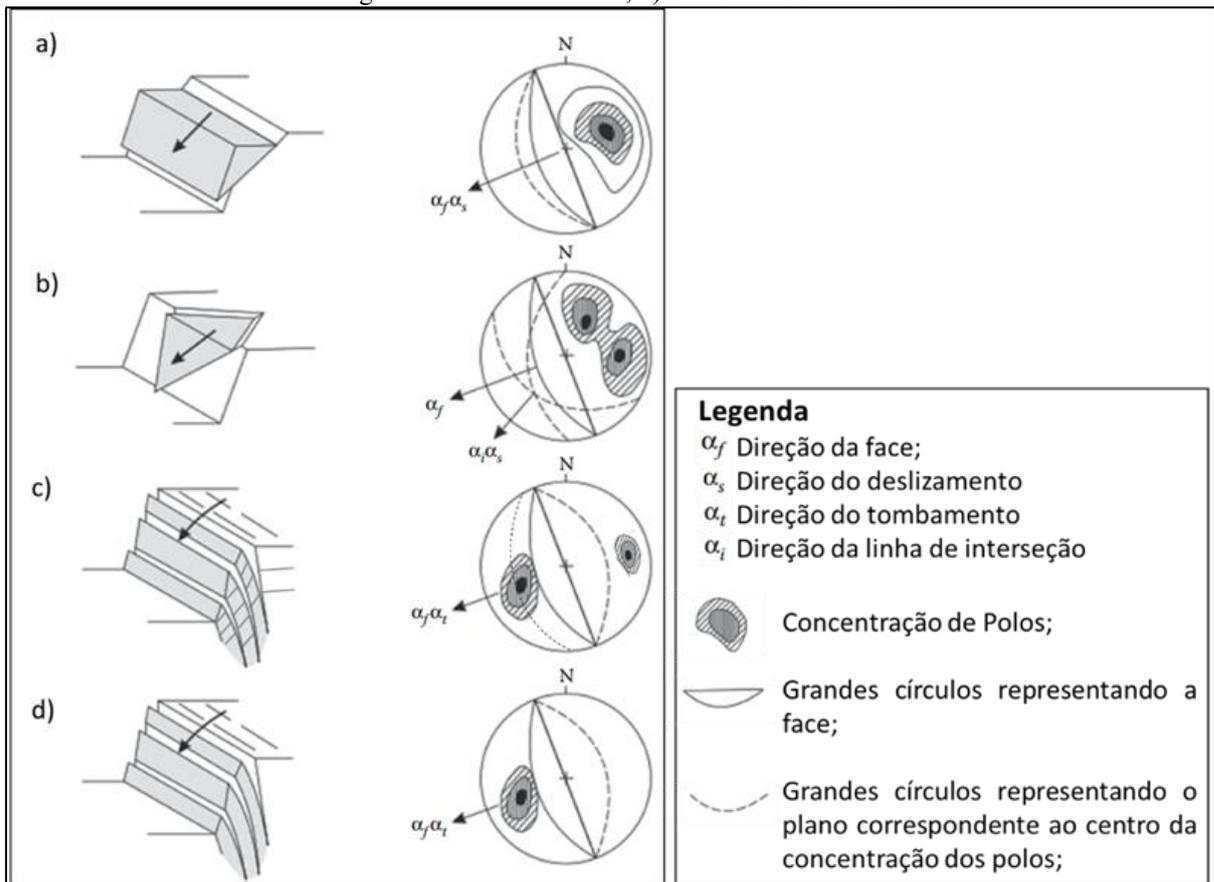
Para ocorrência cinemática de ruptura por cunha, estas condições têm de ser atendidas:

- O talude tem de estar na mesma direção da interseção entre as descontinuidades

analisadas;

- O mergulho da interseção das discontinuidades tem de ser menor que o mergulho do talude;
- A inclinação da linha de interseção das discontinuidades tem de ser maior que o ângulo de atrito do material/litotipo.

Figura 4-1 - Principais tipos de ruptura em taludes rochosos e condições geológico- estruturais que ocasionam a ruptura. a) ruptura planar contendo a discontinuidade mergulhando na direção do talude; b) ruptura em cunha por meio da interseção de duas discontinuidades; c) tombamento direto com uma discontinuidade mergulhando a favor e uma discontinuidade mergulhando contra o talude; d) tombamento flexural.



Fonte: modificado de Wyllie (2004).

4.3.2 Critérios adotados para as análises cinemáticas

- Análises cinemáticas probabilísticas foram realizadas para os setores geométricos coincidentes com os domínios litoestruturais I, II, III e IV;
- Para os setores geométricos nos domínios IV e V, as análises cinemáticas foram determinísticas devido à baixa densidade de dados estruturais;
- Todas as discontinuidades foram consideradas contínuas ao longo dos maciços;

- Foram identificadas rupturas em materiais com resistência R1- ou mais resistentes, e todas as estruturas levantadas foram utilizadas nas análises cinemáticas;
- As análises consideraram as famílias de descontinuidades definidas pela análise estereográfica estrutural da cava;
- A metodologia envolveu a investigação dos dados de cada domínio litoestrutural, considerando a orientação e o ângulo de mergulho dos taludes nos setores geométricos;
- Para cada domínio e setor, avaliou-se o menor ângulo de atrito e o maior ângulo de face dos taludes, considerando a situação mais crítica para a cava atual e final;
- Nas análises cinemáticas probabilísticas, conforme Priest & Brown (1983), probabilidades de ruptura abaixo de 10% foram consideradas como potencialmente estáveis.

A análise cinemática requer a definição do ângulo de atrito para a descontinuidade, dessa forma, foram considerados os ângulos de atritos obtidos através de ensaios (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 - Ângulos de atrito por litotipo considerados nas análises cinemáticas.

Litotipo	Sigla	Ângulo de Atrito
Filito/ Xisto	FL/XI	28
Itabirito Friável	IF	36
Itabirito Manganésífero/ Itabirito Goethítico/ Intrusiva	IMN/IGO/IN	29
Itabirito Compacto/Hematita Compacta/ Hematita Friável	IC/HC/HF	37

Fonte: relatório interno de levantamento geológico-geotécnico.

4.4 COMPILAÇÃO DE ENSAIOS LABORATORIAIS

Foram utilizados dados secundários provenientes dos ensaios mais recentes realizados em rocha, todos tratados conforme as diretrizes da ISRM (International Society for Rock Mechanics). Esses dados derivam de campanhas anteriores de amostragem e ensaios de laboratório, não executadas no âmbito deste trabalho. A amostragem incluiu blocos indeformados, talhados manualmente, de materiais atualmente classificados como *Weak Rock*, além de testemunhos de sondagem de materiais rochosos. A partir desses dados, foram obtidos os parâmetros necessários para as análises de estabilidade por meio do método do equilíbrio limite. Os ensaios realizados e os respectivos parâmetros obtidos estão descritos a seguir:

- Caracterização física (Solos/saprólito) – fornece peso específico dos grãos, teor de umidade, índice de vazios, limite de Atterberg e distribuição granulométrica que podem, posteriormente, ser correlacionáveis a outros parâmetros;

- Cisalhamento direto – (Solos/Saprólito) permite obter parâmetros de resistência ao cisalhamento, como coesão e ângulo de atrito;
- Compressão uniaxial (Rocha) – fornece parâmetros de resistência, como a resistência à compressão uniaxial (UCS), e parâmetros de deformabilidade como módulo de elasticidade (E), e coeficiente de *Poisson* (ν) da rocha intacta;
- Compressão triaxial (Solos, *Weak Rock* e Rocha) – fornece parâmetros de resistência, como coesão e ângulo de atrito. Permite a análise do material em condições drenadas e não drenadas, sendo possível a determinação da poropressão para condições não drenadas;
- Tração indireta (Rocha) – fornece os parâmetros de resistência a tração do material, utilizados para obter os parâmetros utilizados no critério Hoek e Brown.

4.5 ANÁLISE DE ESTABILIDADE

Para a cava, foram definidos dois setores estruturais distintos. O Setor Estrutural 1 apresenta taludes paralelos à principal anisotropia geológica, como bandamentos, xistosidade e foliação. Para essa classificação, foi considerada a atitude global dos planos So em 065/40, uma vez que, de modo geral, esses planos mantêm orientação semelhante ao longo dos diferentes domínios litoestruturais. Já o Setor Estrutural 2 compreende taludes orientados de forma contrária ou oblíqua à principal anisotropia da área.

A análise de estabilidade dos taludes foi conduzida por meio do método de equilíbrio limite. Foram definidas seções críticas, representadas na , juntamente com a localização dos setores estruturais. A seleção dessas seções considerou os seguintes critérios: (i) a geometria da cava, priorizando as áreas com maior potencial de instabilidade; (ii) a presença de contatos entre diferentes litologias; (iii) a orientação das descontinuidades estruturais em relação aos taludes projetados; (iv) as condições operacionais previstas; e (v) o planejamento de lavra. Esses critérios permitiram uma abordagem representativa e direcionada para os cenários mais críticos em termos de estabilidade.

As análises consideraram tanto a escala interrampa quanto global, avaliando os mecanismos de ruptura por cunha, planar e por tombamento. Somente os mecanismos com

probabilidade de ocorrência superior a 10% foram considerados, conforme os critérios propostos por Priest e Brown (1983).

Utilizou-se o software Slide2, da Rocscience, que permite a avaliação de rupturas interrampas e globais por meio dos métodos de Spencer (1967) e GLE/Morgenstern-Price (1965), com base no equilíbrio de forças e momentos aplicados a lamelas de cálculo.

A modelagem levou em conta as características das discontinuidades presentes nos taludes, com especial atenção à anisotropia de resistência, às tensões atuantes nos volumes de material e aos parâmetros das discontinuidades, como rugosidade e resistência ao cisalhamento. Para as seções localizadas em taludes paralelos à principal discontinuidade, foi utilizada a função *anisotropic function*, a fim de representar com maior precisão os parâmetros de resistência associados a foliações, xistosidades e bandamentos, sempre que os dados estavam disponíveis. Também foram consideradas tanto rupturas circulares quanto não circulares, representativas dos taludes analisados, utilizando a função de busca por cunhas *Cuckoo search*.

As análises foram realizadas considerando o cenário de maior criticidade associado à condição de chuvas, visando representar o pior caso de carregamento e saturação nos maciços analisados. As análises determinísticas adotaram, como premissa, que os fatores de segurança aceitos deveriam atender aos critérios de aceitabilidade estabelecidos por Wesseloo e Read (2009). Dessa forma, foram considerados valores mínimos de fator de segurança (FoS) de 1,3 para rupturas globais, entre 1,2 e 1,3 para rupturas interrampas em condições operacionais, e 1,5 nos casos com interferência em estruturas civis, conforme apresentado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Valores do fator de segurança mínimo (FoS) e probabilidade de ruptura máxima (PoF).

Escala de Ruptura	Consequências de Ruptura	Critério de Aceitabilidade		
		FoS - mínimo em situação estática	FoS - mínimo em situação pseudo-estática	PoF - máximo
Bancada	Baixa - Alta	1,10	NA	25 - 50%
Interrampa	Baixa	1,15 - 1,20	1,00	25%
	Média	1,20	1,00	20%
	Alta	1,20 - 1,30	1,10	10%
Global	Baixa	1,20 - 1,30	1,00	15 - 20%
	Média	1,30	1,05	5 - 10%
	Alta	1,30 - 1,50	1,10	< 5%

Fonte: Wesseloo e Read (2009).

5 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir das análises realizadas, abordando aspectos fundamentais para a compreensão do comportamento geotécnico da área estudada. São discutidos a classificação litomecânica, a caracterização das descontinuidades, as análises cinemáticas, a compilação dos parâmetros de resistência litológica dos materiais que compõem as seções e a avaliação da estabilidade das seções críticas.

Inicialmente, são descritas as características litológicas identificadas no local, com base em classificações geomecânicas que consideram propriedades físicas e mecânicas dos materiais. Em seguida, é realizada a caracterização das descontinuidades estruturais, incluindo sua orientação, espaçamento e persistência, fatores que influenciam diretamente a estabilidade dos taludes.

As análises cinemáticas são apresentadas para avaliar os mecanismos potenciais de ruptura, como escorregamentos planares e rupturas em cunha, levando em conta a interação entre as estruturas geológicas e a geometria do talude. Além disso, são compilados os parâmetros de resistência litológica, obtidos a partir de ensaios laboratoriais e valores de referência da literatura, que servem de base para as simulações de estabilidade.

Por fim, são detalhadas as análises de estabilidade das seções críticas, destacando os fatores de segurança (FoS) calculados por diferentes métodos e as implicações dos resultados para a segurança da estrutura. A discussão dos dados permite avaliar se as condições atuais atendem aos critérios de estabilidade recomendados e identificar possíveis estratégias de mitigação, como ajustes na geometria dos taludes, implantação de bermas e sistemas de drenagem.

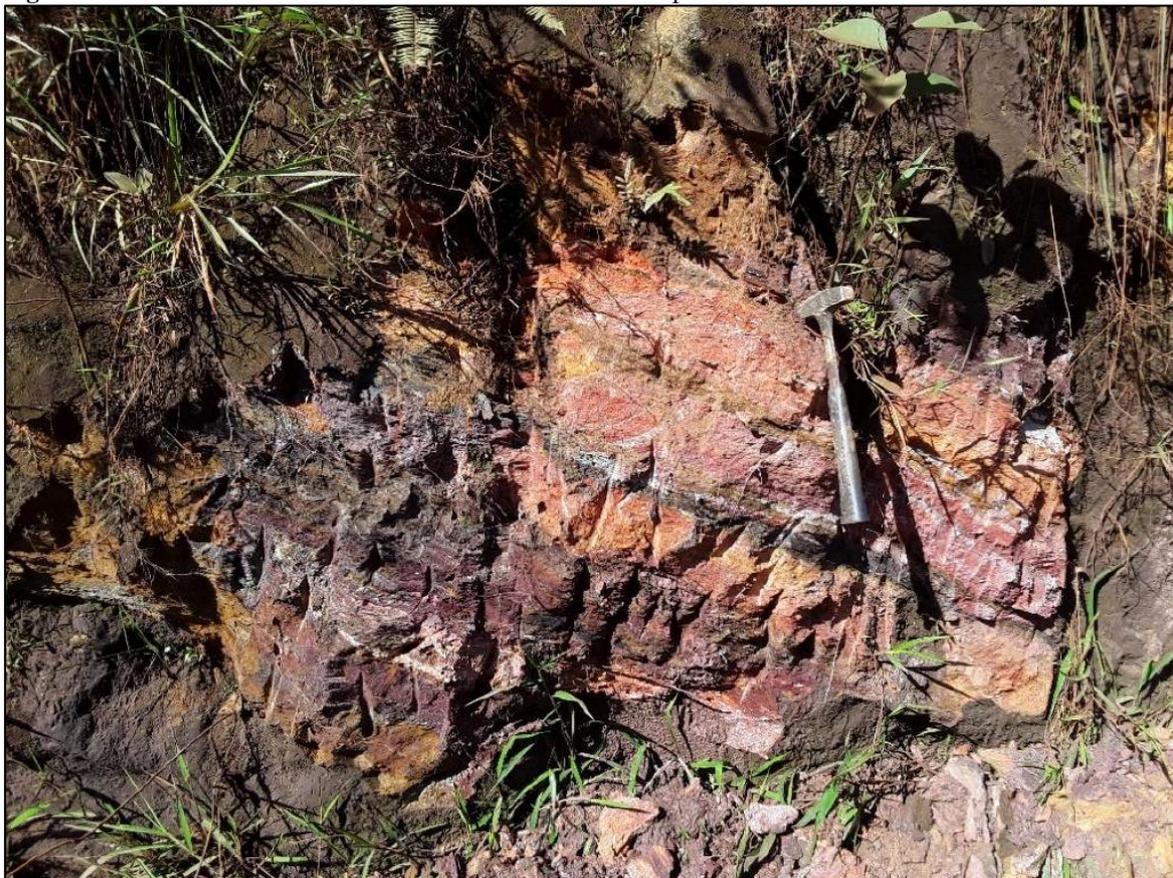
5.1 CARACTERIZAÇÃO LITOMECÂNICA

A classificação litomecânica apresentada nesta seção foi elaborada com base na análise dos dados secundários obtidos a partir dos testemunhos de sondagem e do levantamento geológico-geotécnico, realizados por terceiros. A partir desses dados fornecidos, foi possível identificar e caracterizar os materiais presentes na área de estudo, conforme será detalhado a seguir.:

5.1.1 Xisto (XIS)

Presente nas áreas periféricas e externas da mina, aflora como *weak rock*, com predominância de resistência R0 (Extremamente Brando) e pontos com R1- (Muito brando inferior). O intemperismo é majoritariamente W5 (Completamente intemperizado), com ocorrências pontuais de solo residual (W6) (Figura 5-1).

Figura 5-1 - Foto com detalhe no afloramento de xisto do Grupo Nova Lima.



Fonte: relatório interno de mapeamento geológico.

5.1.2 Quartzito (QTZ)

Localizado apenas em áreas externas e de forma pontual (Figura 5-2), apresenta alta resistência (R5) quando intacto e R0 em solo residual. É pouco intemperizado (W1 a W2) e pouco fraturado (F2), enquadrando-se nas classes I-II (Bieniawski, 1989) e entre regular e excelente (GSI).

Figura 5-2 - Vista geral de afloramento em quartzito.



Fonte: relatório interno de mapeamento geológico.

5.1.3 Filito (FIL)

Classificado como *weak rock*, geralmente com resistência R1- (Muito brando inferior) e intemperismo W5. Em áreas externas ao norte da cava, pode apresentar R1+ (Muito brando superior) e W4 (Intensamente intemperizado) (Figura 5-3). Algumas zonas têm resistência R0, apresentando sulcos erosivos devido à drenagem precária ou inexistente, o que o torna extremamente erodível. Há presença de fraturas nos trechos de resistência R1- e R1+.

Figura 5-3 - Filito da Formação Batatal.



Fonte: relatório interno de mapeamento geológico.

5.1.4 Itabirito Silicoso (ITS):

Com variações geomecânicas (Figura 5-4), inclui:

- Itabirito Silicoso Friável (ISF)

Predominantemente R1- a R1+, com pontos R2- e intemperismo W5. Algumas áreas apresentam resistência R0, mas mantêm estruturas preservadas.

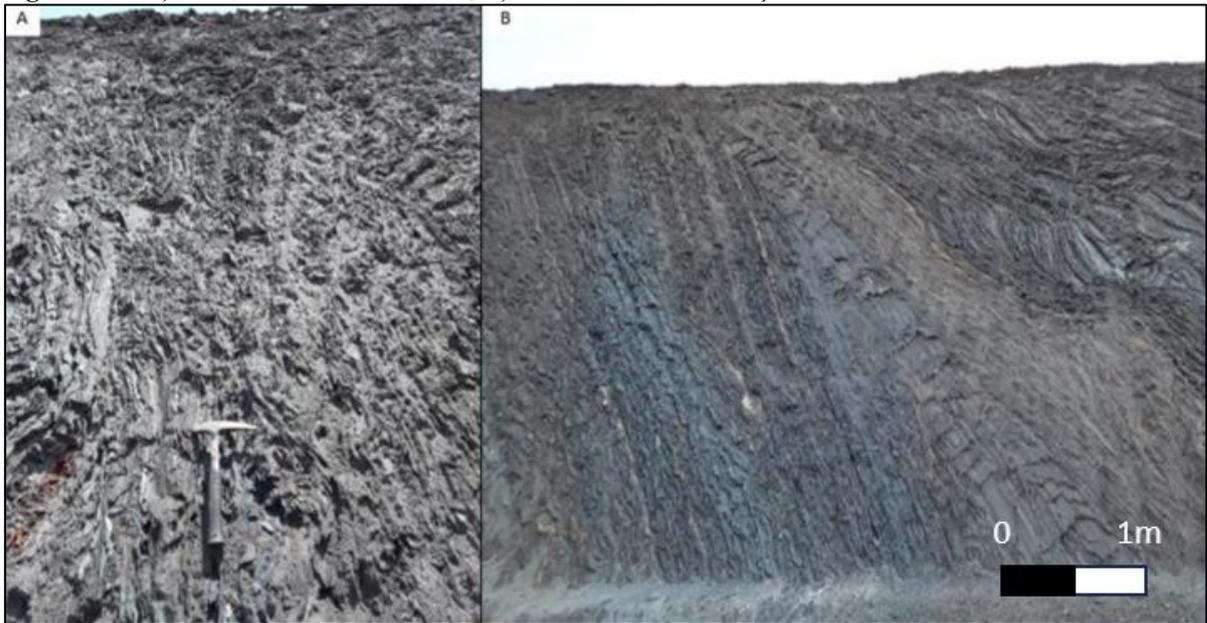
- Itabirito Silicoso Compacto (ISC)

Alta resistência (R4 a R5), com intemperismo W2 e fraturamento F3. O GSI varia entre 41 e 60.

- Itabirito Silicoso Médio (ISM)

Resistência entre R2+ e R3, com intemperismo predominante W4 e fraturamento F3 a F4. A maioria dos maciços é Classe IV, com poucos Classe III.

Figura 5-4 - A) Talude em itabirito silicoso; B) evidências de deformação no itabirito silicoso.



Fonte: relatório interno de mapeamento geológico.

5.1.5 Itabirito Silicoso Intercalado a Itabirito Goethítico (ITS-IGO)

Apresenta-se em pontos como friável e em outros como compacto.

- Friável (ITSF-IGOF)

Principalmente R1- com intemperismo W5, mantendo estruturas preservadas, mas minerais alterados.

- Compacto (ITSC-IGOC)

Resistência de R2+ a R5 (predominando R2+ a R4), com intemperismo W2 a W4 e fraturamento F3. Classificável como Classe III-IV (Figura 5-5).

5.1.6 Itabirito Goethítico (IGOF)

Todos os afloramentos são dados como *weak rock*, com resistência R0 a R1- e intemperismo W5, mantendo bandamento preservado.

5.1.7 Intrusiva (INT)

Predominantemente *weak rock* (R0 e R1-), com pontos de maior resistência (R2+ e R3) em áreas específicas (Figura 5-6). Essa rocha está bastante relacionada a um NA suspenso,

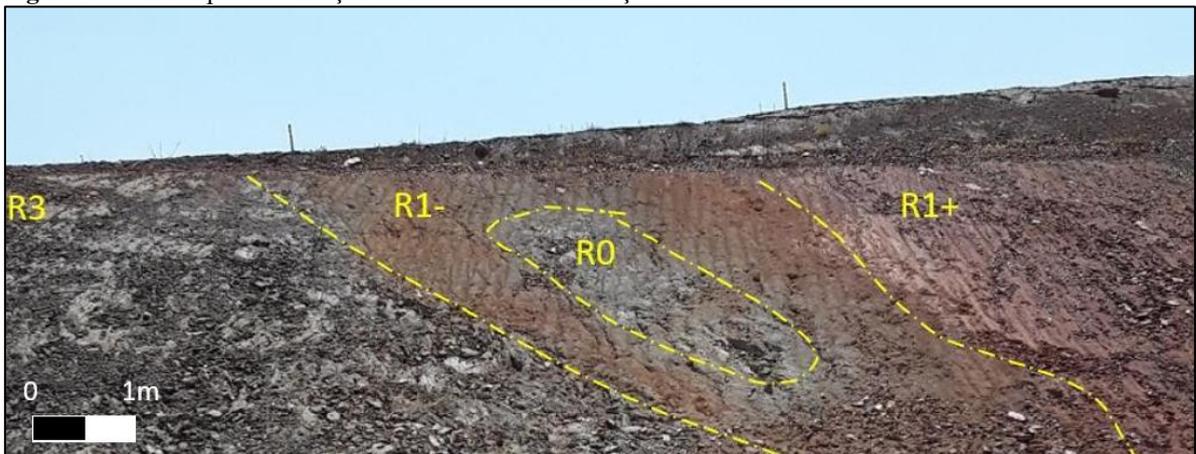
quando apresenta coloração esverdeada é tido como um referencial de presença de água, apresentando vegetação no talude que a contém, por exemplo samambaias.

Figura 5-5 - Itabirito silicoso intercalado com itabirito goethítico.



Fonte: relatório interno de mapeamento geológico.

Figura 5-6 - Exemplo de variação de resistência em maciços de rocha intrusiva.



Fonte: relatório interno de mapeamento geológico.

A Tabela 5.1 sintetiza os parâmetros geomecânicos observados durante o mapeamento da mina.

Tabela 5.1 - Tabela síntese dos parâmetros geomecânicos dos maciços rochosos.

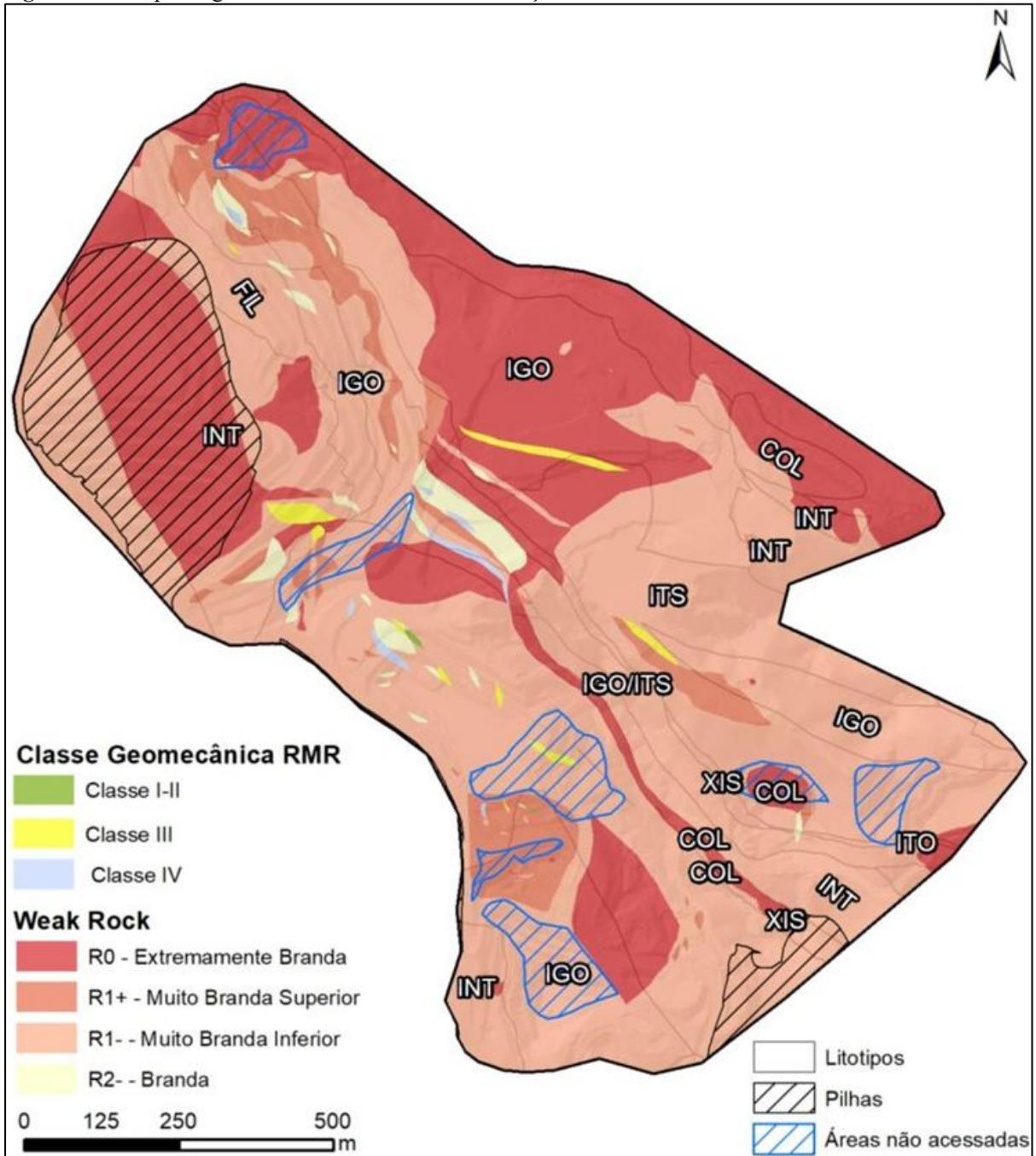
Litologia	Grau de Resistência		Grau de Alteração		Grau de Fraturamento		Metodologia <i>Weak Rock</i> + RMR		Faixas de GSI	
	Predom.	Faixas	Predom.	Faixas	Predom.	Faixas	Predom.	Faixas	Predom.	Faixas
Quartzito (QTZ)	R5	R0 e R4	W1	W2/W3 e W6	F2	F1 e F3	Classe I-II	Classe III	61 a 80	>80 e 41 a 60
Xisto (XIS)	R0	R0 a R1-	W5	W5 e W6	-	-	Extremamente Branda	Extremamente branda e muito branda superior	-	-
Filito (FIL)	R1-	R0 e R1+	W5	W6 e W4	-	-	Muito Branda Inferior	Extremamente branda e muito branda superior	N/A	0 a 15
Itabirito Silicoso Friável (ISIF)	R1-	R0 a R2-	W5	W6 e W4	-	-	Muito Branda Inferior	Extremamente branda a branda	N/A	0 a 15
Itabirito Silicoso Médio (ITM)	R2+	R3	W4	W3 e W2	F3	F4	Não classificado	Classes III e IV	21 a 40 e 40 a 60	-
Itabirito Silicoso Compacto (ITC)	R4	R5	W2	W1 e W3	F4	F2 e F3	Classe I-II	Classe III	41 a 60	0 a 15 a 61 a 80
Itabirito Silicoso intercalado a Itabirito Goethítico Friável	R1-	R0 a R2-	W5	W4	-	-	Muito Branda Inferior	Extremamente branda a branda	N/A	0 a 15

Litologia	Grau de Resistência		Grau de Alteração		Grau de Fraturamento		Metodologia <i>Weak Rock</i> + RMR		Faixas de GSI	
	Predom.	Faixas	Predom.	Faixas	Predom.	Faixas	Predom.	Faixas	Predom.	Faixas
(ITS-IGOF)										
Itabirito Silicoso intercalado a Itabirito Goethítico Compacto (ITS-IGOC)	R2+ e R4	R3 e R5	W4	W2 e W3	F3	F2 e F4	Classe IV	Classes I-II e III	41 a 60	21 a 40 e 61 a 80
Itabirito Goethítico (IGOF)	R1-	R0 a R2-	W5	W6 e W4	-	-	Muito Branda Inferior	Extremamente branda a branda	N/A	0 a 15
Intrusiva	R1-	R0 a R5	W5	W1 a W6	N/A	F3 e F5	Muito Branda Inferior	Extremamente branda a muito branda superior	N/A	0 a 15, 21 a 40 e 41 a 60

Fonte: relatório de mapeamento geológico.

A Figura 5-7 ilustra a distribuição das unidades litológicas aflorantes de acordo com a classificação geomecânica.

Figura 5-7 - Mapa litogeomecânico baseado na classificação RMR e *weak rock*.



5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES

No levantamento geomecânico foram identificadas quatro estruturas geológicas planares: acamamento (So), bandamento (Sb), foliação/xistosidade (Sn) e fratura (Fr). Essas estruturas foram caracterizadas com base em parâmetros geomecânicos, como espaçamento, persistência, abertura, rugosidade (Jr), índice Ja, resistência e intemperismo das paredes, além do material de preenchimento.

5.2.1 Acamamento (So)

A caracterização das descontinuidades passou por alguns processos, uma vez que a mina é composta predominantemente por materiais classificados como *weak rock*. Nos pontos caracterizáveis, o acamamento apresentou espaçamento moderado, variando entre 20 e 60 centímetros, persistência alta, menor que 20 metros e abertura nula. A rugosidade variou de plana lisa a plana áspera, com paredes levemente alteradas e superfícies descoloridas. As descontinuidades possuem resistência R5, alteração entre W1 e W2 e, quando há preenchimento, este ocorre por quartzo.

5.2.2 Bandamento (Sb)

As descontinuidades do bandamento (Sb) apresentam espaçamento geralmente pequeno (6-20 cm), podendo variar entre muito pequeno (<6 cm) e moderado (20-60 cm). São persistentes a muito persistentes (>10 m) e, em sua maioria, sem abertura, exceto em alguns casos ($\geq 0,1$ mm a 5 mm). A rugosidade varia entre ondulada áspera, plana áspera e plana lisa. As paredes são predominantemente levemente alteradas, com alguns casos de superfícies descoloridas, revestimento siltoso e preenchimento fino com partículas arenosas. A resistência e o intemperismo são majoritariamente R2+ e W4, com preenchimento por quartzo e óxidos.

5.2.3 Foliação/Xistosidade (Sn)

A foliação/xistosidade (Sn) tem espaçamento predominantemente pequeno (6-20 cm), variando entre muito pequeno (<6 cm) e moderado (20-60 cm). É muito persistente (>20 m) a persistente (10-20 m), com abertura nula ou entre 1-5 mm. A rugosidade varia entre plana áspera e plana lisa, e as paredes são levemente alteradas. A resistência e o intemperismo predominam em R5 e W2. O preenchimento é majoritariamente por quartzo, com presença de óxidos e argila.

5.2.4 Fraturas (Fr)

As fraturas foram as descontinuidades mais caracterizadas, seu espaçamento varia de pequeno a grande, ocasionalmente muito grande, e sua persistência, em geral, é de 3 a 10 m. A abertura vai de nula a >5 mm, sendo predominantemente $\leq 0,1$ mm. A rugosidade varia de ondulada áspera a recortada áspera, com predomínio de plana áspera. As paredes são majoritariamente levemente alteradas, com revestimento siltoso. A resistência predominante é R2+ ou R5, com alteração W2 e W4, e o preenchimento ocorre por quartzo e óxidos.

As fraturas foram agrupadas em famílias FR1, FR2, FR3 e FR4, destacando-se que muitas estruturas mapeadas não se enquadram nessas orientações. A seguir, são apresentadas as características de cada família individualmente.

a) Fratura FR1

As fraturas da família FR1 possuem espaçamento moderado a grande (20-200 cm), persistência de 1-10 m e abertura geralmente nula, ocasionalmente entre 1-5 mm. A rugosidade é plana áspera, e as paredes são levemente alteradas, com revestimento siltoso. A resistência é predominante em R5, com alteração variando entre W1, W2 e W5. O preenchimento ocorre por quartzo, com óxidos ocasionais.

b) Fratura FR2

As fraturas da família FR2 possuem espaçamento predominantemente muito grande (60-200 cm) e persistência geralmente ≤ 1 m. A abertura varia de nula a >5 mm, e a rugosidade alterna entre ondulada áspera, plana áspera e, ocasionalmente, recortada áspera. As paredes têm revestimento siltoso, com leve alteração. A resistência é R2+ e R3, e o intemperismo varia entre W3 e W4. O preenchimento ocorre por quartzo, com óxidos ocasionais.

c) Fratura FR3

A caracterização das fraturas da família FR3, assim como do acamamento (S0), é frequentemente complexa. Nos planos caracterizáveis, apresentam espaçamento de pequeno (6-20 cm) a moderado (20-60 cm), persistência inferior a 1 m ou entre 1-3 m e abertura nula. A rugosidade é plana áspera, com paredes levemente alteradas. A resistência e o intemperismo são predominantemente R5 e W2, e o preenchimento, quando presente, ocorre por quartzo.

d) Fratura FR4

Quando caracterizável, a família de fraturas FR3 apresenta o espaçamento predominantemente pequeno (6-20 cm), com persistência variada, mas principalmente entre 3 e 10 m. A abertura é geralmente nula ou, na maioria dos casos, $<0,1$ mm. A rugosidade é principalmente ondulada áspera, mas também pode ser plana áspera ou recortada áspera. As paredes são levemente alteradas ou revestidas por material siltoso. A resistência é

predominantemente R5 e o intemperismo W2, com preenchimento por quartzo quando presente.

A Tabela 5.2 resume os parâmetros geomecânicos das discontinuidades mapeadas na mina. Como a maioria dos afloramentos é composta por rochas brandas, a avaliação do grau de fraturamento não se aplica. Afloramentos recobertos, que não puderam ser avaliados, como são indicados no mapa de grau de fraturamento (Figura 5-8).

Figura 5-8 - Mapa de grau de fraturamento.

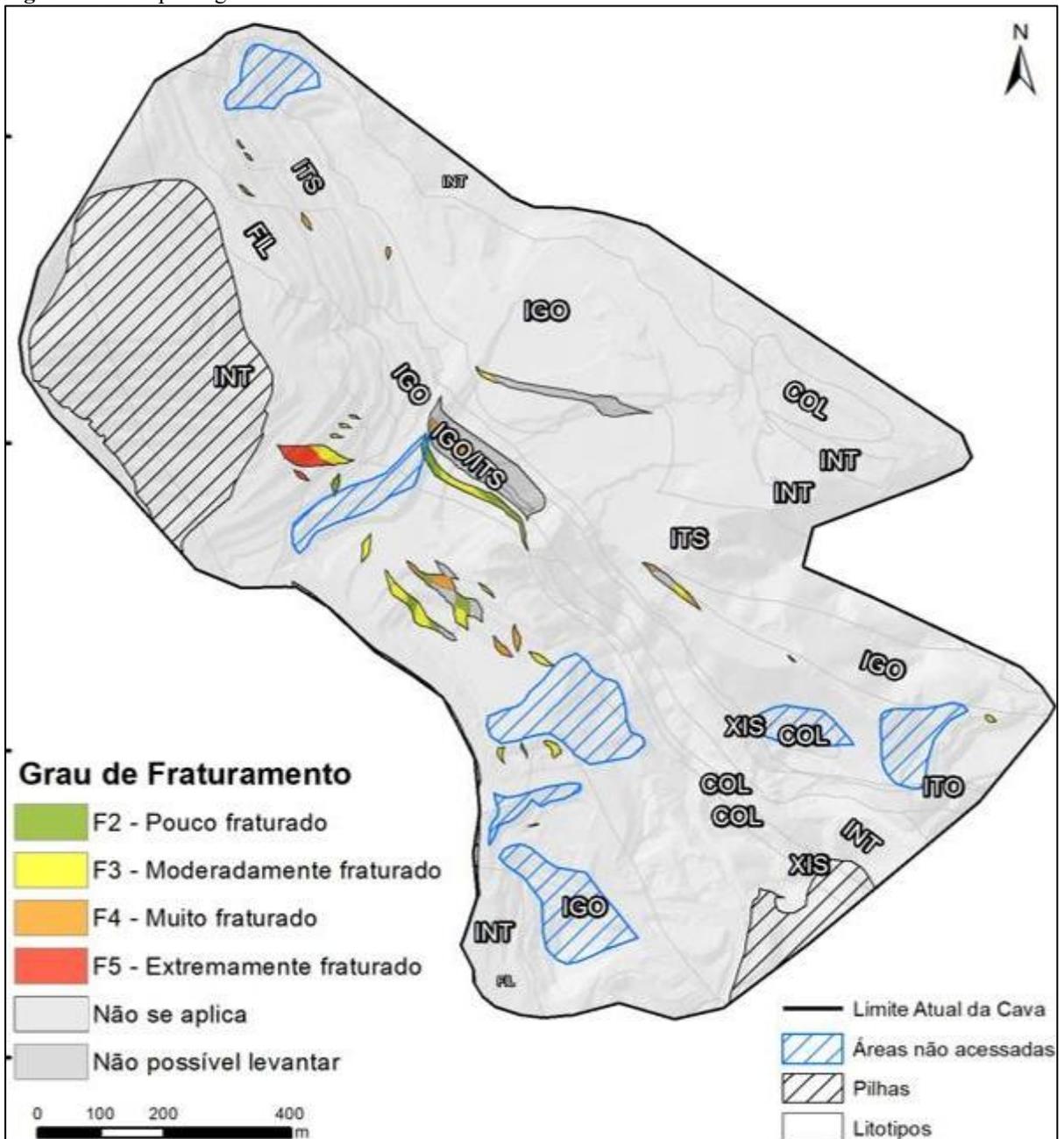


Tabela 5.2 - Síntese dos parâmetros das descontinuidades.

Descontinuidades	Espaçamento	Persist.	Ab.	Índice Jr	Índice Ja	Resistência das paredes	Intemperismo das paredes	Material de preenchimento
Acamamento (S0)	Moderado	>20m	Nula	Plana áspera e lisa	Superfícies descoloridas e paredes levemente alteradas	R5	W1 e W2	Quartzo
Bandamento (Sb)	Moderado a grande	>20m e 10 a 20 m	Nula a 1 a 5 mm	Ondulada e plana áspera e lisa	Paredes levemente alteradas com variação de descolorida a revestimento siltoso	R2+ (R1- a R5)	W4 (W1 a W5)	Quartzo, óxidos e hematita
Foliação/Xistosidade (Sn)	Muito pequeno a moderado	>20m e 10 a 20 m	Nula e 1 a 5 mm	Plana áspera e lisa	Paredes levemente alteradas	R5 e R3	W2 (W1 a W4)	Quartzo, óxidos e argila
Faturas (Fr)	Pequeno a muito grande	<=1m a 10 a 20 m	Nula a >5mm	Ondulada áspera, plana áspera e recortada áspera	Paredes levemente alteradas com variação e paredes com revestimento	R2+ e R5	W2 (W1 a W5)	Quartzo, óxidos e ocasionalmente hematita ou sem preenchimento

Descontinuidades	Espaçamento	Persist.	Ab.	Índice Jr	Índice Ja	Resistência das paredes	Intemperismo das paredes	Material de preenchimento
					siltoso			
Fraturas (FR1)	Moderado a grande	1 a 3 m e 3 a 10 m	Nula e 1 a 5 mm	Plana áspera	Paredes levemente alteradas e paredes com revestimento siltoso	R5 e R2+	W1, W2 e W5	Quartzo e óxidos
Fraturas (FR2)	Grande, moderado a pequeno	≤ 1 m a 3 a 10 m	Nula a >5 mm	Ondulada áspera, plana áspera e recortada áspera	Paredes com revestimento siltoso e paredes levemente alteradas	R2+ e R3	W3 e W4	Quartzo e óxidos
Fraturas (FR3)	Pequeno a moderado	≤ 1 m a 1 a 3 m	Nula	Plana áspera	Paredes levemente alteradas	R5	W2	Quartzo
Fraturas (FR4)	Pequeno a grande	≤ 1 m a 3 a 10 m	Nula a $\leq 0,1$ mm	Ondulada áspera, plana áspera e recortada áspera	Paredes levemente alteradas e paredes com revestimento siltoso	R5 e R4	W2	Quartzo ou sem preenchimento

Fonte: relatório interno de mapeamento geológico.

5.3 ANÁLISE CINEMÁTICA

As análises cinemáticas foram conduzidas nos mesmos setores onde se encontram inseridas as seções representativas adotadas para as análises de estabilidade, dessa forma apenas alguns setores geométricos e domínios litoestruturais serão abordados a seguir. Essa abordagem visa garantir a coerência entre a caracterização estrutural dos maciços rochosos e a modelagem geotécnica, possibilitando a identificação dos mecanismos potenciais de instabilização nas áreas efetivamente representadas nos modelos de equilíbrio limite.

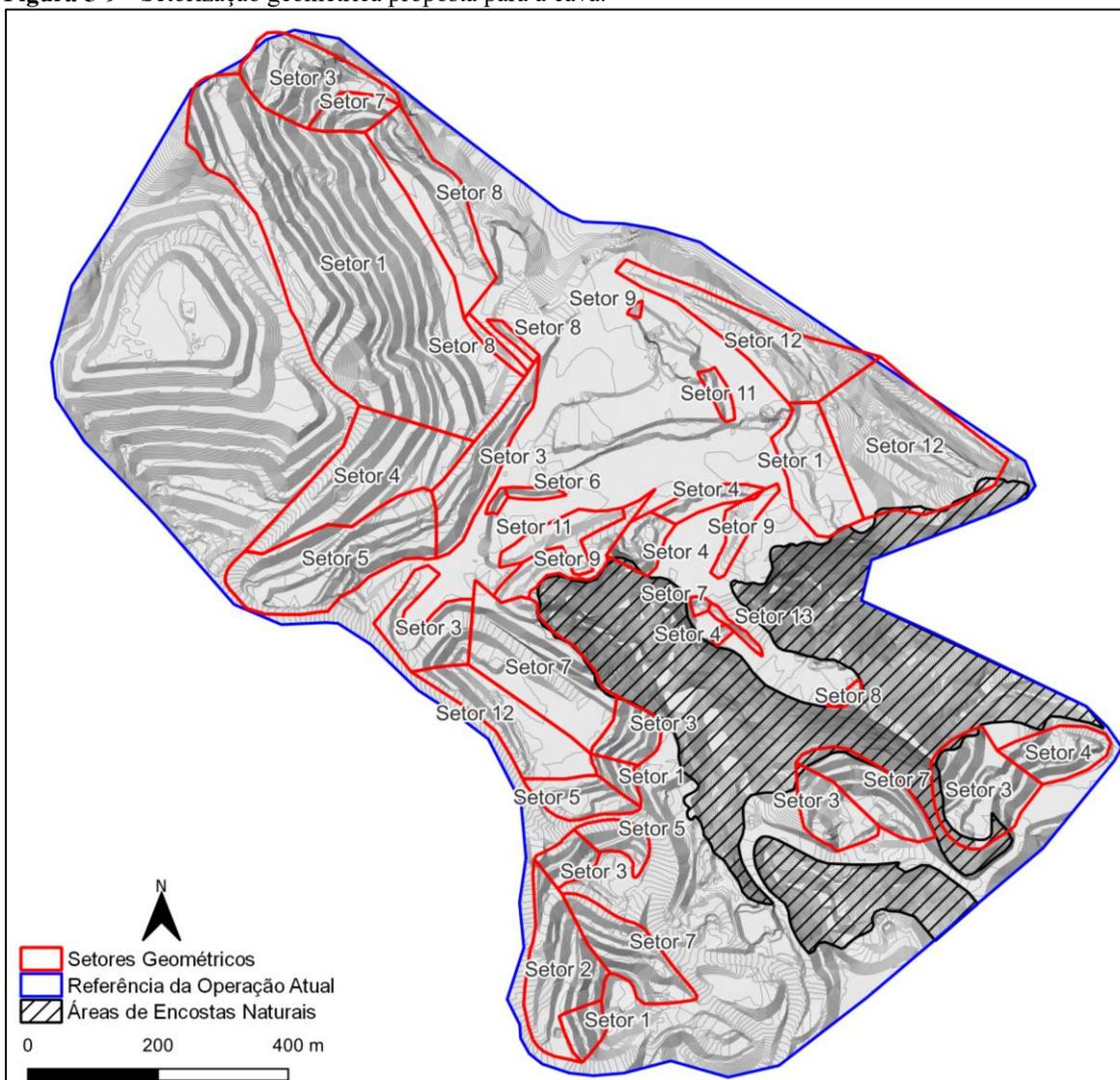
5.3.1 Setorização geométrica

A cava foi dividida em setores geométricos conforme a metodologia descrita no item 1.1.1. A relação entre os setores e a distribuição dos ângulos de face dos taludes está apresentada na Tabela 5.3 e ilustrada na Figura 5-9. Essa síntese serve como ponto de partida para as análises cinemáticas por domínio estrutural, que são discutidas a seguir. Serão abordados aqueles setores que englobaram as seções analisadas.

As análises consideraram o maior ângulo de face em cada setor dentro dos domínios litoestruturais, de modo a representar a pior condição possível para cada caso. De maneira geral, os taludes mais inclinados apresentam um ângulo de face de 40°, embora, no setor 1, esse valor alcance 45°, enquanto outros setores exibem inclinações menores.

Tabela 5.3 - Organização geométrica avaliada.

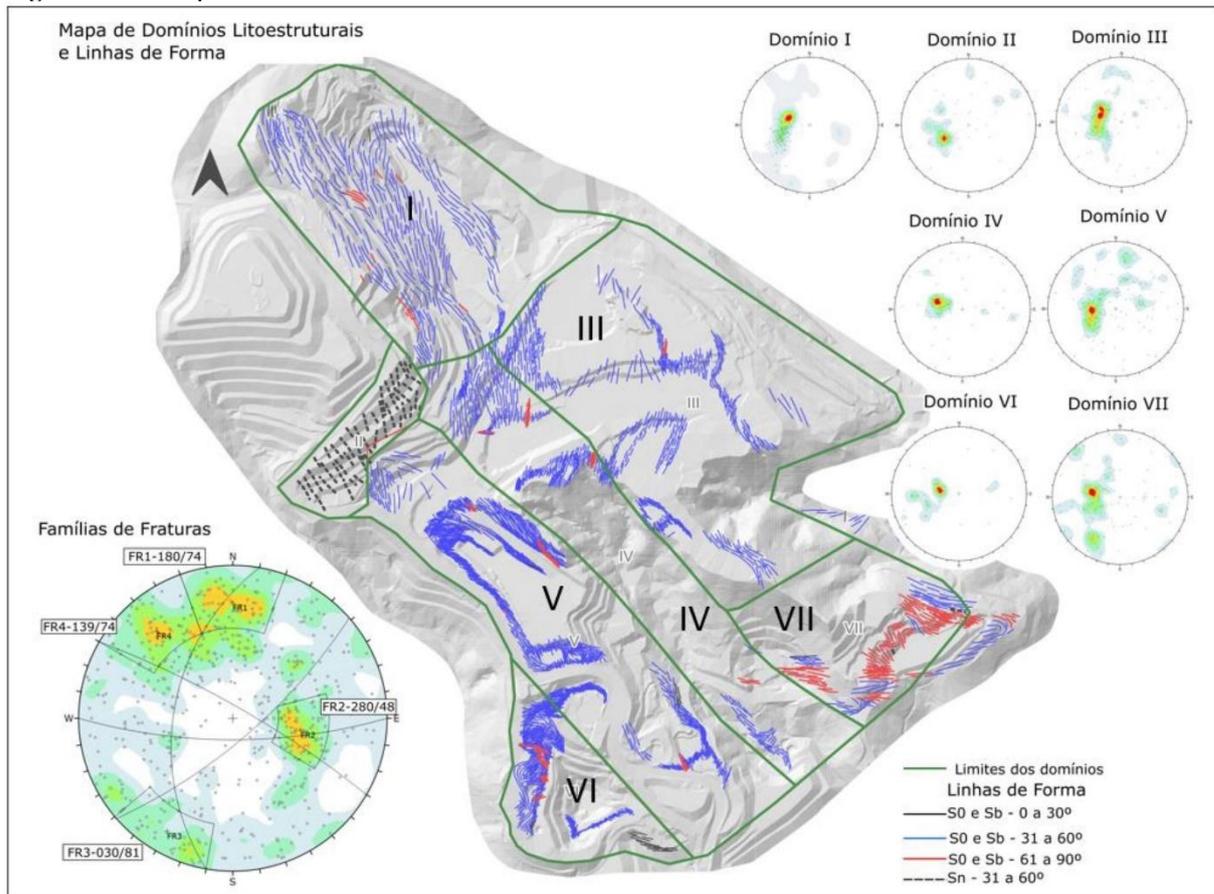
Setor Geométrico	Orientação	Ângulo de Face
Setor 1	070	45
Setor 2	105	40
Setor 3	118	40
Setor 4	138	40
Setor 5	155	35
Setor 7	205	40
Setor 8	225	35
Setor 12	105	40

Figura 5-9 - Setorização geométrica proposta para a cava.

5.3.2 Domínios litoestruturais

A análise das estruturas planares observadas na fase de mapeamento permitiu uma melhor compreensão do contexto estrutural da mina. Essas estruturas desempenham um papel fundamental nos processos de instabilização, tanto em nível de bancada quanto global, sendo essenciais para as análises subsequentes. Além disso, sua relação com formações regionais e mesorregionais possibilitou a definição dos domínios litoestruturais, considerando a organização e distribuição das estruturas na área de operação da cava (Figura 5-10).

Figura 5-10 - Mapa de domínios litoestruturais e linhas de forma.



Serão discutidos nesse item aqueles domínios que englobam as seções que foram escolhidas para as análises de estabilidade (Figura 5-11).

- Domínio I

O domínio I está localizado na porção norte da cava, abrangendo os setores 1 e 8, os quais são compostos principalmente por formações ferríferas bandadas, com porções de filito e rocha intrusiva.

As análises indicaram potenciais rupturas planares no setor 1, alinhadas com observações de campo (Figura 5-12), onde essas rupturas são visíveis nos taludes, especialmente no itabirito, onde as bandas quartzosas apresentam maior intemperismo que as hematíticas. Além disso, foram identificadas rupturas em cunha nos setores 1 e 8, majoritariamente de pequena escala, muitas vezes semelhantes às rupturas planares quando as fraturas associadas não são claramente perceptíveis.

Figura 5-11 - Traços das seções analisadas.

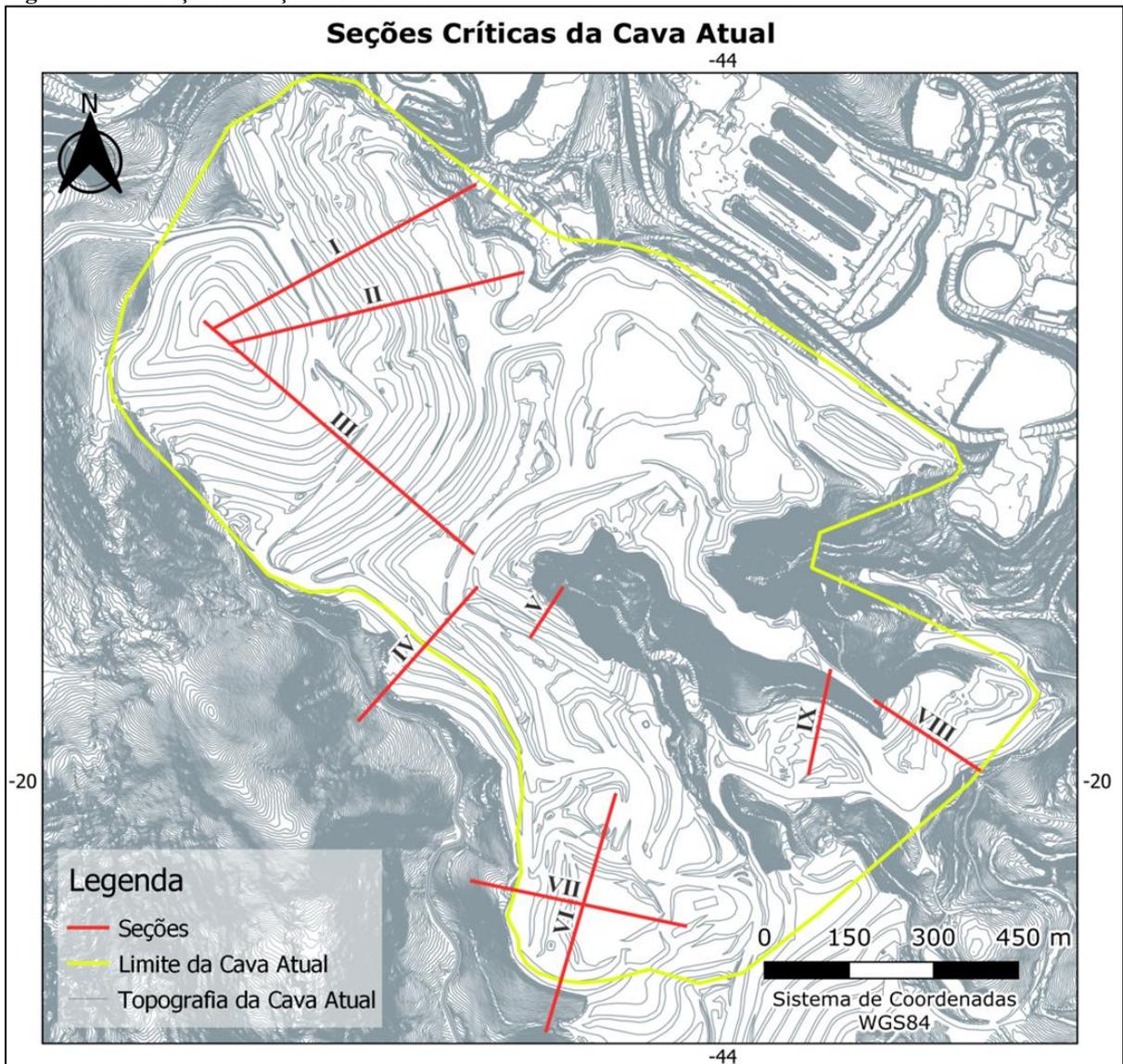


Figura 5-12 - Talude em itabirito friável no setor 1, apresentando rupturas planares.



Fonte: relatório interno de mapeamento geológico.

Tabela 5.4 - Resultado do potencial de ruptura para o conjunto de estruturas do domínio I.

Domínio	Setor	Orientação Talude		Φ	Ruptura com Probabilidade de Ocorrência maior que 10%	
		Mergulho	Direção		Planar	Cunha
Domínio I	Setor 1	45	070	28	Sb/S0/Sn (23,53%)	Fr1xFr3 (15,71%) Sb/S0xFr1 (37,58%) Sb/S0xFr2 (17,61%) Sb/S0XFr3 (32,26%) Sb/S0xFr4 (40,54%)
	Setor 8	35	225	29	-	Fr2xFr4 (27,73%)

Φ – ângulo de atrito;

Fr_x – família de fratura x;

S0/Sb/Sn – acamamento/bandamento/foliação;

“-“ – não identificado potencial de ruptura com probabilidade maior que 10%

- Domínio II

Esse domínio também está localizado na porção norte da cava, abrangendo os setores 4 e 5, compostos majoritariamente por rocha intrusiva, com pequenas porções de filito e itabirito (Tabela 5.5). No setor 4, foram identificados potenciais de ruptura em cunha, o que se alinha com as observações em campo, onde a interseção entre a foliação e algumas direções de fraturas favorece esse tipo de instabilidade. Ainda assim, os processos mais predominantes nesse domínio estão relacionados ao comportamento de *weak rocks*, devido ao rápido intemperismo da rocha intrusiva.

Tabela 5.5 - Resultado do potencial de ruptura para o conjunto de estruturas do domínio II.

Domínio	Setor	Orientação Talude		Φ	Ruptura com Probabilidade de Ocorrência maior que 10%	
		Mergulho	Direção		Planar	Cunha
Domínio II	Setor 4	40	138	29	-	Sb/SnxFr1 (25,00%)
	Setor 5	35	155	28	-	-

Φ – ângulo de atrito;

Fr_x – família de fratura x;

S0/Sb/Sn – acamamento/bandamento/foliação;

“-“ – não identificado potencial de ruptura com probabilidade maior que 10%

- Domínio V

Em campo se observou rupturas planares no setor 12, apesar de não identificáveis nas análises cinemáticas. Conforme identificado na análise cinemática, em campo foi possível observar as rupturas em cunha nos setores 3 e 7, sendo as primeiras associadas à interseção do bandamento dos itabiritos com as famílias de fratura e o segundo da interação das famílias de fratura (Tabela 5.6).

Tabela 5.6 - Resultado do potencial de ruptura para o conjunto de estruturas do domínio V.

Domínio	Setor	Orientação Talude		Φ	Ruptura com Probabilidade de Ocorrência maior que 10%	
		Mergulho	Direção		Planar	Cunha
Domínio V	Setor 3	40	118	28	-	Sb/S0xFr1 (57,14%)
	Setor 7	40	205	29	-	Fr2xFr3 (39,17%)
	Setor 12	35	50	28	-	Sb/S0xFr4 (13,10%)

Φ – ângulo de atrito;

Fr_x – família de fratura x;

S0/Sb/Sn – acamamento/bandamento/foliação;

“-“ – não identificado potencial de ruptura com probabilidade maior que 10%

- Domínio VI

As análises cinemáticas no domínio VI indicaram potencial de ruptura planar no setor 2, com rupturas de baixo volume, agravadas pela inclinação dos taludes. Devido a áreas inacessíveis, o setor 7 foi avaliado à distância, onde se observou a possibilidade de cunhas não identificadas nas análises. A Figura 5-13 ilustra as rupturas planares e em cunha, com volume baixo, no domínio VI (Tabela 5.7).

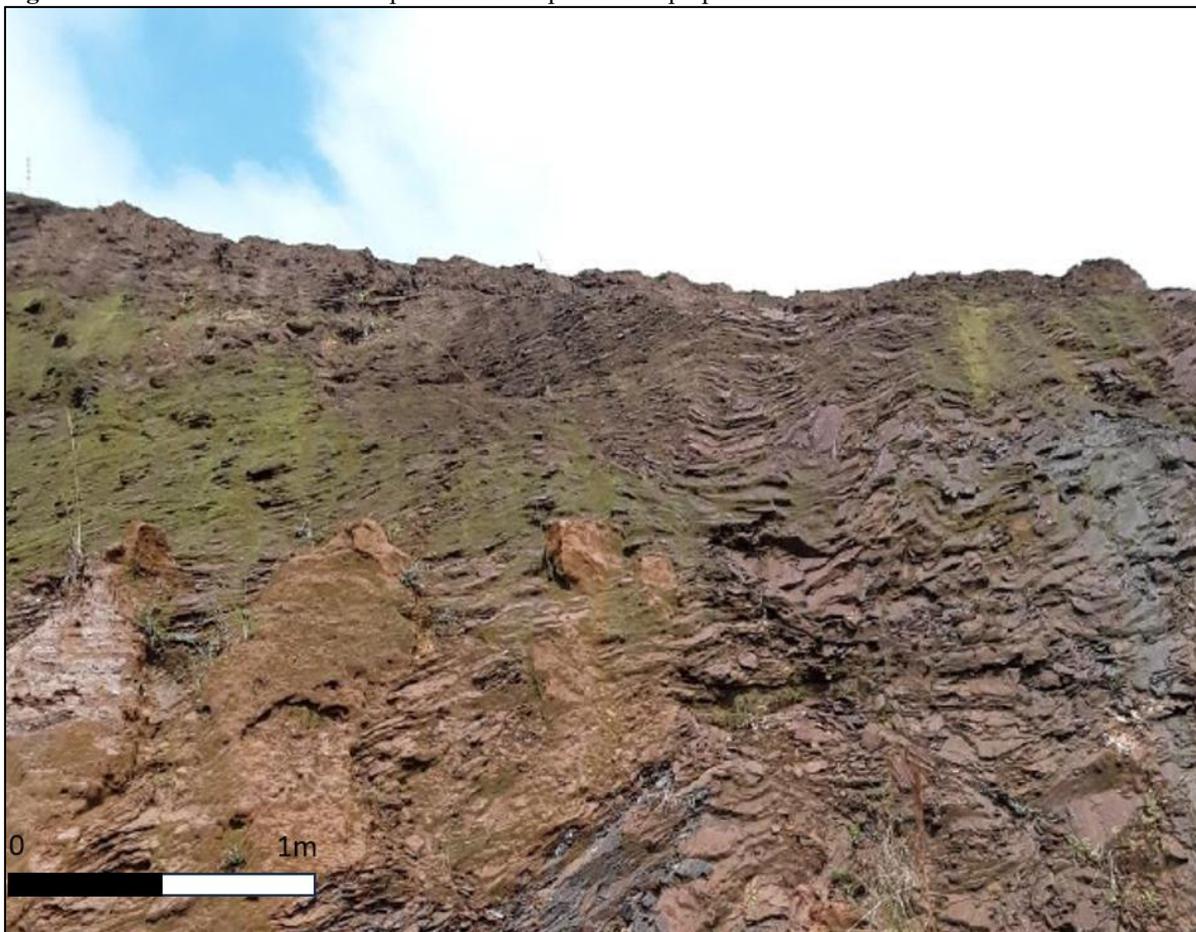
Tabela 5.7 - Resultado do potencial de ruptura para o conjunto de estruturas do domínio VI.

Domínio	Setor	Orientação Talude		Φ	Ruptura com Probabilidade de Ocorrência maior que 10%	
		Mergulho	Direção		Planar	Cunha
Domínio VI	Setor 1	45	070	28	-	Sb/S0xFr1 (16,67%)
	Setor 2	40	105	28	Sb/S0/Sn (11,11%)	-

Domínio	Setor	Orientação Talude		Φ	Ruptura com Probabilidade de Ocorrência maior que 10%	
		Mergulho	Direção		Planar	Cunha
	Setor 7	40	205	36	-	-

Φ – ângulo de atrito;
 Frx – família de fratura x;
 S0/Sb/Sn – acamamento/bandamento/foliação;
 “-“ – não identificado potencial de ruptura com probabilidade maior que 10%

Figura 5-13 - Taludes em itabirito apresentando rupturas do tipo planar e cunha.



Fonte: relatório de mapeamento geológico.

5.4 PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA LITOLÓGICA

A partir dos resultados dos ensaios e parametrização dos materiais presentes na área de estudo, foi realizado a compilação destes e sua tabulação, como é representado nas Tabela 5.8 a Tabela 5.11.

Tabela 5.9 - Parâmetros compilados para os materiais existentes nas seções de análise - Parte II.

Itabirito Goethítico IGO - (IGOC, IGOE, IMNF, IMNC),					
		Classe II-I	Classe III	Classe IV	R2- a R0
Índices Físicos	g (kN/m ³)	30	30	30	28
	Classificação Hoek-Brown				
Classificação Hoek-Brown	s _c (MPa)	65,3	48,4	48,4	
	GSI	65	54	40	
	m _i	6,1	4,4	4,4	
	D	0	0	0	
Hoek-Brown	m _b	1,706	0,823	0,823	
	s	0,0194	0,0054	0,0054	
	a	0,502	0,505	0,505	
Mohr-Coulomb	c (kN/m ²)				34
	f (°)				27
Anisotropic Strength Index	c // (kN/m ²)				
	f // (°)				
	c _/_(kN/m ²)				
	f _/_(°)				
	Ângulo				Variável

Tabela 5.11 - Parâmetros compilados para os materiais existentes nas seções de análise - Parte IV.

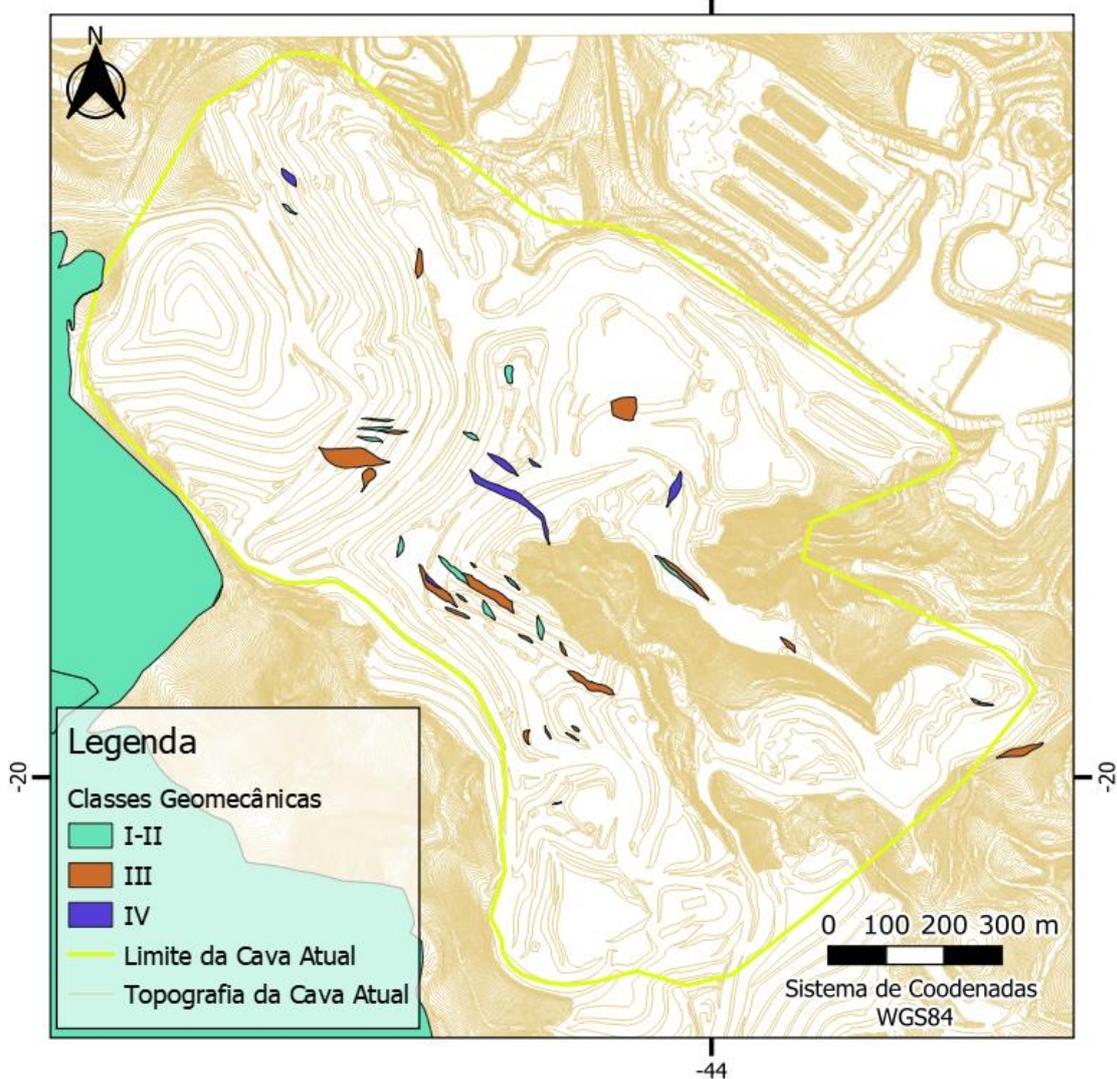
		Quartzito – QT (QZF, QZC)				Colúvio - COL	Canga - CG	Aterro - AT
		Classe I-II	Classe III	Classe IV	R2+ a R0			
Índice Físicos	g (kN/m ³)	26,44	26,44	26,44	18,19	18	22,6/24,9	18
	Classificação Hoek-Brown	s _c (MPa)	180,27	95,07	35			
	GSI	65	60	29				
	m _i	24.99	24.99	21,825				
	D	0	0	0				
Hoek-Brown	m _b	6,904	5,775	2				
	s	0,0205	0,0117	0,0004				
	a	0,502	0,503	0,524				
Mohr-Coulomb	c (kN/m ²)				9,3	6	30	5
	f (°)				34,4	27	30	28
Anisotropic Strength Index	c // (kN/m ²)							
	f // (°)							
	c _/_(kN/m ²)							
	f _/_(°)							
	Ângulo							

5.5 ANÁLISE DE ESTABILIDADE

Para a geometria da cava, não se fez necessária a análise de bancada para rupturas condicionadas por descontinuidades (cunha, planar e tombamentos), uma vez que afloramentos rochosos (Classes I-II; III e IV) dispõem-se na cava de maneira pouco expressiva como é observado na Figura 5-14.

As análises de estabilidade dos taludes foram realizadas considerando os cenários mais críticos, de modo a representar condições desfavoráveis à estabilidade. Para isso, adotou-se o período chuvoso como referência, uma vez que o aumento do teor de umidade e da poropressão nos maciços tende a reduzir os parâmetros de resistência dos materiais geotécnicos, favorecendo a ocorrência de instabilidades.

Figura 5-14 – Mapa da disposição das classes geomecânicas dos maciços rochosos presentes na cava.



Seguindo a metodologia descrita no item 4.4, 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) (Tabela 4.2). A Tabela 5.12 apresenta todos os valores encontrados nas análises, tanto segundo o método Spencer quanto GLE/Morgenstern-Price.

Tabela 5.12 - 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

Os fatores de segurança (FoS) obtidos nas análises apresentaram elevada consistência, evidenciada pela proximidade dos resultados entre os diferentes métodos aplicados. Essa convergência reforça a confiabilidade das abordagens adotadas, com destaque para o método GLE/Morgenstern-Price, que demonstrou comportamento mais conservador. Tal característica decorre da maior flexibilidade do método na definição da distribuição das forças entre as fatias, possibilitando a utilização de diversas funções de inclinação, em contraste com a suposição de uma variação linear fixa adotada em métodos mais simplificados.

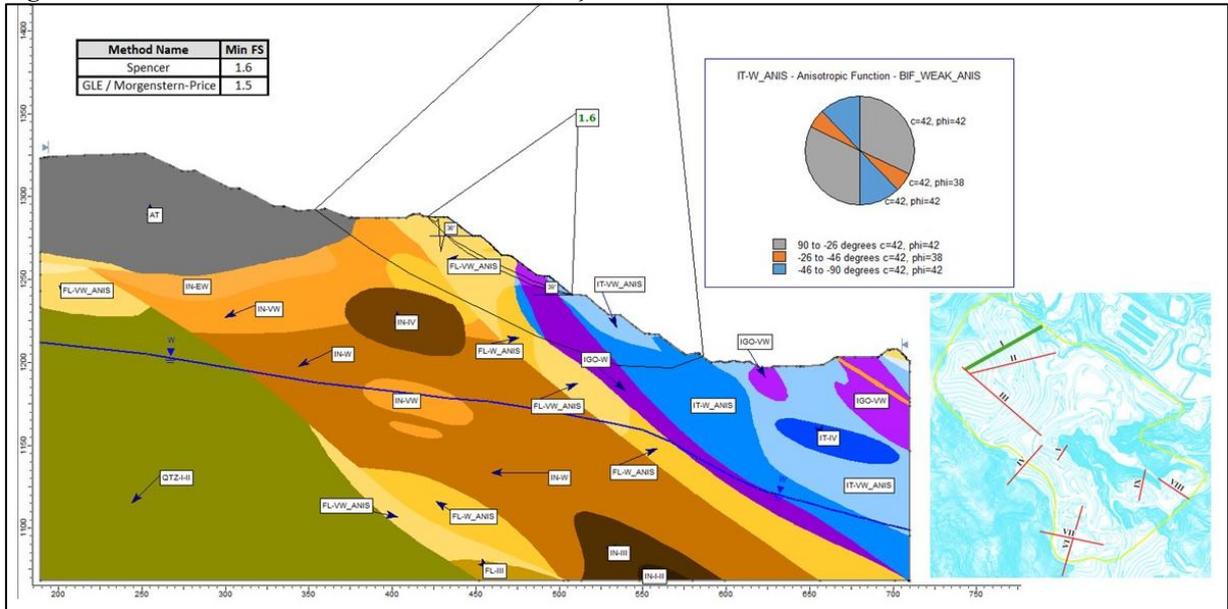
Tanto o método de Spencer quanto o GLE/Morgenstern-Price garantem o equilíbrio global de forças e momentos; entretanto, o GLE/Morgenstern-Price oferece a vantagem adicional de verificar a convergência da solução, tornando a análise mais rigorosa. Essa abordagem possibilita estimativas mais confiáveis do fator de segurança, sendo particularmente relevante em cenários com incertezas ou comportamento anisotrópico do material.

5.5.1 Seção I

A seção I (Figura 5-15) apresenta função de anisotropia (*anisotropic function*), a qual indica que a resistência ao cisalhamento varia conforme a orientação dos planos de falha, em

que certas direções apresentam menor ângulo de atrito interno (ϕ), o que pode favorecer rupturas localizadas.

Figura 5-15 - Análise de estabilidade realizada na Seção I.



A região composta pelos materiais itabirito goethítico brando (IGO-W), itabirito brando (IT-W_ANIS) e itabirito muito brando (IT-VW_ANIS) apresenta anisotropias que influenciam diretamente a análise de estabilidade, da mesma forma que é importante salientar que os materiais são tidos como menos competentes. Essas características resultam em uma redução da resistência do maciço, aumentando a suscetibilidade à instabilidade. Esse comportamento é evidenciado pela linha de ruptura, que atravessa esses materiais, confirmando sua maior vulnerabilidade.

O fator de segurança obtido na escala interrampas, para ambos os métodos, está acima da faixa recomendada por Wesseloo e Read (2009). Para situações estáticas, os valores típicos indicam um FoS mínimo de 1,20 quando as consequências da ruptura são médias e uma faixa de 1,20 a 1,30 para consequências altas. Dessa forma, os resultados indicam uma condição de estabilidade aceitável dentro dos critérios estabelecidos.

Como essa seção apresentou um dos menores fatores de segurança em relação às demais, é essencial adotar medidas de monitoramento e mitigação para prevenir possíveis instabilidades. O uso de piezômetros e inclinômetros permite acompanhar a evolução da estabilidade do talude, enquanto intervenções como drenagem eficiente, ampliação de bermas,

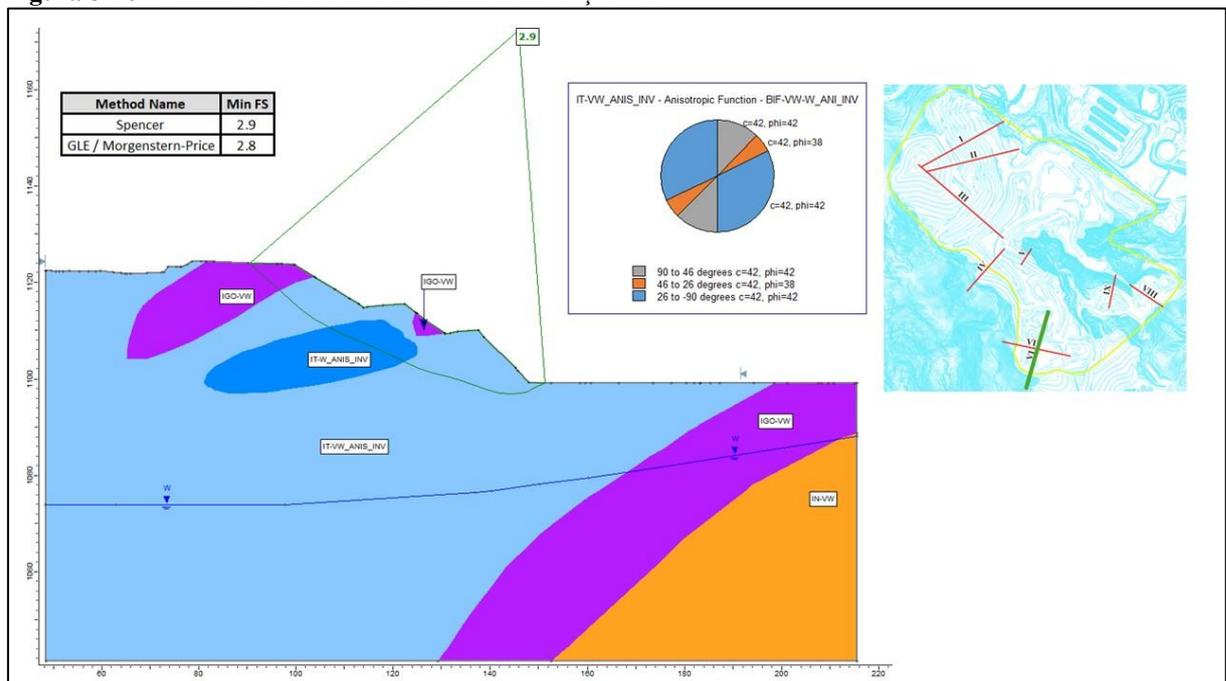
aplicação de concreto projetado e instalação de chumbadores podem ser implementadas, se necessário, para reforçar a estrutura e garantir sua segurança.

5.5.2 Seção VI

Ambos os métodos indicaram fatores de segurança (FoS) superiores aos valores típicos de referência (FoS entre 1,30 e 1,50). Observa-se ainda a influência da função de anisotropia, que promove uma redução do ângulo de atrito interno (ϕ) de 42° para 38° dentro do intervalo de orientação das descontinuidades, variando entre 46° e 26° , enquanto a coesão permanece constante. Mesmo com a diminuição do ângulo de atrito, os fatores de segurança calculados continuam elevados, evidenciando a estabilidade global do talude analisado.

A linha de ruptura atravessa os materiais menos competentes como itabirito goethítico muito brando (IGO-VW), itabirito muito brando (IT-VW_ANIS_INS) e itabirito brando (IT-W_ANIS_INS), os quais apresentam anisotropias que estão diretamente relacionadas a estabilidade do maciço, uma vez que a superfície de ruptura aproveita a direção de menor resistência.

Figura 5-16 – Análise de estabilidade realizada na Seção VI.

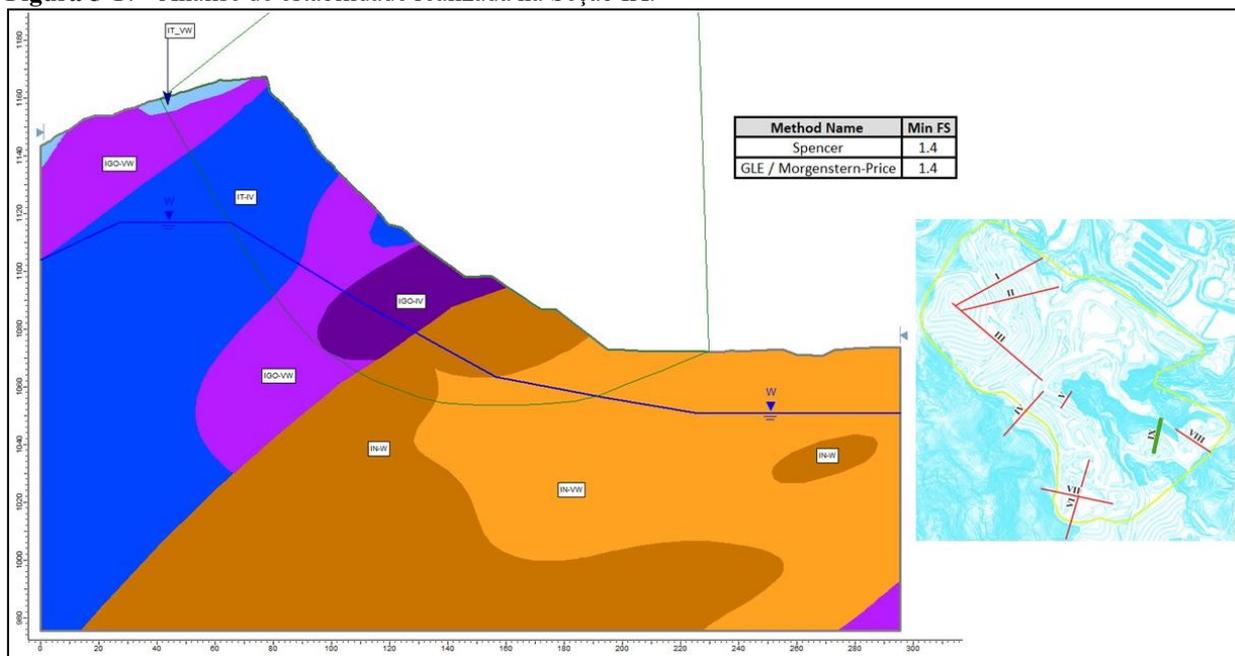


5.5.3 Seção IX

Dentre todas as seções analisadas, a Seção IX (Figura 5-17) apresentou o menor fator de segurança (FoS), com um valor de 1,4 tanto pelo método de Spencer quanto pelo método

GLE/Morgenstern-Price, considerando a escala global. De acordo com os critérios de Wesselo e Read (2009), os valores de referência para fatores de segurança mínimos em análises estáticas variam entre 1,30 e 1,50, enquanto para condições pseudo-estáticas o limite aceitável é 1,10. Dessa forma, a geometria analisada pode ser considerada estável nas condições atuais.

Figura 5-17 - Análise de estabilidade realizada na Seção IX.



Ao contrário das seções descritas anteriormente, a Seção IX não incluiu a análise com a função de anisotropia, pois os materiais presentes nessa seção não exibem anisotropias significativas em relação aos parâmetros de resistência.

Um aspecto crítico observado nesta seção é a elevada inclinação do talude na porção esquerda, por estar em área de terreno natural, fator que contribui diretamente para a redução do fator de segurança. Para mitigar essa condição e melhorar a estabilidade do talude, recomenda-se a redução da inclinação das faces dos bancos, a implantação de bermas adequadas e um sistema eficiente de drenagem superficial, minimizando os efeitos da água na resistência dos materiais e prevenindo processos erosivos que possam comprometer a segurança da estrutura.

As imagens referentes as análises de estabilidades das seções II, III, IV, V, VII e VIII estão nos apêndices deste trabalho.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo analisar a estabilidade de taludes em uma cava a céu aberto de minério de ferro situada no Sinclinal Moeda, adjacente ao Sinclinal Dom Bosco, no Quadrilátero Ferrífero, uma região de grande relevância geológica e mineral em Minas Gerais. Os parâmetros tratados e adotados neste trabalho podem ser utilizados como referência para essa região.

A pesquisa combinou métodos tradicionais de classificação geomecânica, análises cinemáticas e avaliações de equilíbrio limite, com o intuito de compreender os mecanismos de ruptura e estabelecer diretrizes para garantir a segurança estrutural da escavação.

A caracterização geomecânica revelou uma grande heterogeneidade litológica na área de estudo, com litotipos variando de rochas mais brandas, como xistos (R0-R1⁻) e filitos (R1⁻), até materiais mais resistentes, como quartzitos (R5) e itabiritos compactos (R4-R5). A presença de estruturas como acamamento, bandamento e fraturas se mostrou um fator crítico, afetando diretamente a estabilidade dos taludes. A análise cinemática, realizada por meio de projeções estereográficas, identificou áreas de risco associadas a rupturas planares e em cunha, principalmente nas regiões onde a orientação dos taludes coincidiu com a direção das descontinuidades, as quais foram regiões potenciais a serem submetidas a análises de bancada, o que não foi necessário devido a maciços rochosos pouco expressivos na cava.

As análises de equilíbrio limite global, utilizando métodos como Spencer e Morgenstern-Price apontaram fatores de segurança (FoS) dentro dos parâmetros aceitáveis para as seções analisadas.

Este estudo reforça a importância de abordagens multidisciplinares em projetos de engenharia, que integrem dados geológicos, geotécnicos e geomecânicos. A utilização de metodologias como RMR, GSI e *Weak Rock* se mostrou eficaz na classificação dos maciços, enquanto as análises cinemáticas e estáticas forneceram informações valiosas para o planejamento de taludes seguros e economicamente viáveis.

Salienta-se que este trabalho foi realizado para o cenário de cava atual, refletindo uma circunstância da escavação no ano de 2023. Diante das evoluções das escavações, este estudo necessita ser atualizado.

Por fim, o trabalho não só contribui para o entendimento da estabilidade das operações da cava em questão no cenário de cava atual, mas também oferece um modelo metodológico que pode ser aplicado em contextos semelhantes, destacando a importância de um monitoramento contínuo e da adaptação às condições dinâmicas do maciço rochoso. Em um setor onde segurança e eficiência são fundamentais, pesquisas como essa desempenham um papel crucial no equilíbrio entre a exploração dos recursos naturais, a preservação ambiental e a integridade estrutural.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Estabilidade de encostas. (ABNT NBR 11682). Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br>.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rochas para revestimento – Parte 5: Determinação da resistência à compressão uniaxial. (ABNT NBR 15845-5). Rio de Janeiro, 2015.
- ABRAMSON, L. W. (org.). Slope stability and stabilization methods. 2nd. ed. New York: Wiley, 2002.
- ALKMIM, F. F. Histórico das investigações estratigráficas, estruturais e geotectônicas do Quadrilátero Ferrífero. *In: QUADRILÁTERO FERRÍFERO: AVANÇOS DO CONHECIMENTO NOS ÚLTIMOS 50 ANOS*. Belo Horizonte, MG: 3i Editora Ltda, 2020. p. 18–69.
- ALKMIM, F. F. *et al.* Tectonic Genealogy of a Miniature Continent. *In: SÃO FRANCISCO CRATON, EASTERN BRAZIL*. Cham: Springer International Publishing, 2017. (Regional Geology Reviews). p. 321–331. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-01715-0_17. Acesso em: 28 nov. 2023.
- ALKMIM, F. F.; MARSHAK, S. Proterozoic contraction/extension tectonics of the southern São Francisco Region, Minas Gerais, Brazil. *Tectonics*, [s. l.], v. 8, n. 3, p. 555–571, 1989.
- ALKMIM, F. F.; MARSHAK, S. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, [s. l.], 1998.
- ALKMIM, F. F.; MARTINS-NETO, M. A. A Bacia Intracratônica e a Faixa Orogênica do Espinhaço em Minas Gerais: Relações entre rifteamento e inversão tectônica. *Revista Brasileira de Geociências*, [s. l.], v. 31, p. 21–28, 2001.
- ALKMIM, F. F.; MARTINS-NETO, M. A.; TRAVASSOS, W. A. S. Compartimentação tectônica do Cráton do São Francisco: uma revisão. *Revista Brasileira de Geociências*, [s. l.], p. 119–130, 2006.
- ALMEIDA, F. F. M. de. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, [s. l.], v. 7, p. 349–364, 1977.
- ASSIS, A. P. Mecânica das Rochas. Brasília, DF, 2013. Apostila do Curso Básico.
- ASTM INTERNATIONAL. Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils. , 2020a.
- ASTM INTERNATIONAL. Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils. , 2023.
- ASTM INTERNATIONAL. Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils. , 2020b.

BALTAZAR, O. F.; ZUCCHETTI, M. Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: A review of the setting of gold deposits. *Ore Geology Reviews*, [s. l.], v. 32, n. 3–4, p. 471–499, 2007.

BARTON, N. Review of a new shear-strength criterion for rock joints. *Engineering Geology*, [s. l.], v. 7, n. 4, p. 287–332, 1973.

BARTON, N.; LIEN, R.; LUNDE, J. Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. *Rock Mechanics*, [s. l.], p. 189–236, 1974.

BIENIAWSKI, Z. T. Engineering Classification of Jointed Rock Masses. [S. l.]: Transaction of the South African Institution of Civil Engineers, 1973.

BIENIAWSKI, Z. T. Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering. Toronto, Canada: Wiley-Interscience, 1989.

BISHOP, A. W. The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes. *Geotechniques*, [s. l.], 1955. p. 7–17.

BRADY, B. H. G.; BROWN, E. T. Rock mechanics: for underground mining. 3rd eded. Dordrecht: Kluwer academic publishers, 2004.

BROWN, E. T.; ISRM. Rock characterization, testing & monitoring : ISRM suggested methods. Oxford, New York: Pergamon Press, 1981.

CAPUTO, H. P. Mecânica Dos Solos – Teoria E Aplicação. 8. ed. Rio de Janeiro, RJ: Ltc-Livros Tecnicos E Cientificos Editora Lda, 2022.

CAPUTO, H. P. Mecânica dos solos e suas aplicações: Fundamentos. [S. l.]: Ltc-Livros Tecnicos E Cientificos Editora Lda, 2011. v. 1

CELLA, P. R.; ALMEIDA, L. G.; CASTRO, L. M. Geomechanical Classification in Weak Rocks Masses: Application of a Modified RMR System to an Open Pit Mine. *In: 14TH ISRM CONGRESS, 2019. Anais [...]. [S. l.: s. n.], 2019.*

CELLA, P.; CASTRO, L.; CARTER, T. Mining Slopes in Weathered and Weak Rocks. *In: KANJI, M.; HE, M.; RIBEIRO E SOUSA, L. (org.). Soft Rock Mechanics and Engineering. Cham: Springer International Publishing, 2020. p. 373–406. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-29477-9_13. Acesso em: 5 set. 2024.*

DAS, B. M.; SOBHAN, K. Fundamentos de engenharia geotécnica. [S. l.]: Cengage Learning, 2021.

DEERE, D. U.; DEERE, D. W. Rock Quality Designation (RQD) After Twenty Years. Washigton: Departament of The Army - US Army Corps of Engineers, 1989.

DORR, J. V. N. Physiographic, stratigraphic, and structural and structural development of the Quadrilatero Ferrifero, Minas Gerais, Brazil: Geological Survey Professional Paper. Washigton: Agency for International Development of the United States Departament of State, 1969.

DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S. G.; BRANDON, T. L. Soil strength and slope stability. Second editioned. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2014.

DUQUE, T. R. F. O Grupo Itacolomi em sua área tipo: estratigrafia, estrutura e significado tectônico. 2018. 152 f. Mestrado - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Geologia., Ouro Preto, 2018.

ENDO, I.; CASTRO, P. de T. A.; GANDINI, A. L. Quadrilátero ferrífero: avanços do conhecimento nos últimos 50 anos. Belo Horizonte, MG: 3i Editora Ltda, 2020.

ENDO, I.; DARDENNE, M. A.; PEDROSA-SOARES, A. C. Geologia do Quadrilátero Ferrífero: Uma síntese atualizada. Geociências, [s. l.], v. 39, p. 59–82, 2020.

FARINA, F. *et al.* The Archean–Paleoproterozoic evolution of the Quadrilátero Ferrífero (Brasil): Current models and open questions. Journal of South American Earth Sciences, [s. l.], v. 68, p. 4–21, 2016.

FELLENIUS, W. Calculation of the Stability of Earth Dams. Washigton: [s. n.], 1936.

FIORI, A. P. Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: Aplicações na estabilidade de taludes. [S. l.]: Oficina de Textos, 2015.

FREDLUND, D. G.; KRAHN, J. Comparison of slope stability methods of analysis. Canadian Geotechnical Journal, [s. l.], v. 14, n. 3, p. 429–439, 1977.

FREITAS, S. B. N. Caracterização Geomecânica e Classificações RMR e SMR de Maciços Rochosos em Taludes do Funchal. 2011. 124 f. Mestrado - Universidade da Madeira, Funchal, 2011.

GERSCOVICH, D. M. S. Estabilidade de taludes. [S. l.]: Oficina de Textos, 2021.

HOEK, E. Practical Rock Engineering. British Columbia: [s. n.], 2007. Disponível em: <https://www.roscience.com/assets/resources/learning/hoek/Practical-Rock-Engineering-Full-Text.pdf>.

HOEK, E.; BRAY, J. Rock slope engineering. 3. rev. ed., reprinteded. London: E & FN Spon, 2001.

HOEK, E.; BRAY, J. W. Rock Slope Engineering: Stability and Design. 3. ed. Londres: Institution of Mining and Metallurgy, 1977.

HOEK, E.; BROWN, E. T. Empirical Strength Criterion for Rock Masses. Journal of the Geotechnical Engineering Division, [s. l.], v. 106, n. 9, p. 1013–1035, 1980.

HOEK, E.; KAISER, P. K.; BAWDEN, W. F. Support of Underground Excavations in Hard Rock. Rotterdam, Netherlands: A. A. Balkema, 1995.

ISRM. Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials. International Kpurnal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, [s. l.], 1979. p. 135–140.

JAQUES, D. S. Caracterização e classificação de maciços rochosos da mina de Volta Grande, Nazareno, Minas Gerais. 2014. 202 f. MestradoViçosa, 2014.

LOMBELLO, J. C. *et al.* (org.). Mapa de prospectividade para ouro orogênico do Greenstone Belt Pitangui. Belo Horizonte, MG: Serviço Geológico do Brasil - CPRM, 2022. (Províncias Minerais do Brasil, v. 38).

MARINOS, V. A revised, geotechnical classification GSI system for tectonically disturbed heterogeneous rock masses, such as flysch. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, [s. l.], v. 78, n. 2, p. 899–912, 2017.

MARINOS, V. Tunnel behaviour and support associated with the weak rock masses of flysch. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, [s. l.], v. 6, n. 3, p. 227–239, 2014.

MARINOS, P.; HOEK, E. GSI: A Geological Friendly Tool for Rock Mass Strength Estimation. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTECHNICAL AND GEOLOGICAL ENGINEERING*, 2000, Melbourne. *Proceedings of the Geological Engineering*. Melbourne: [s. n.], 2000. p. 1422–1446.

MARINOS, V.; MARINOS, P.; HOEK, E. The geological strength index: applications and limitations. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, [s. l.], v. 64, n. 1, p. 55–65, 2005.

MARQUES, E. *Mecânica das rochas*. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2021.

MESQUITA, J. Maciços rochosos em projetos hidrelétricos: proposta de classificação geomecânica. *Geotecnia*, [s. l.], n. 130, p. 33–56, 2008.

MORGENSTERN, N. R.; PRICE, V. E. The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces. *Géotechnique*, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 79–93, 1965.

NOCE, C. M.; MACHADO, N.; TEIXEIRA, W. U-Pb Geochronology of Gneisses and Granitoids in the Quadrilátero Ferrífero (Southern São Francisco Craton): Age Constraints for Archean and Paleoproterozoic Magmatism and Metamorphism. *Revista Brasileira de Geociências*, [s. l.], v. 28, n. 1, p. 95–102, 1998.

PALMSTROM, A. Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD). *Tunnelling and Underground Space Technology*, [s. l.], v. 20, n. 4, p. 362–377, 2005.

PAZ, V. M. *et al.* Levantamento das descontinuidades e avaliação da estabilidade de taludes da mina do Mangueirão. *Revista Monografias Ambientais*, [s. l.], v. 14, p. 98–115, 2015.

PEDROSA-SOARES, A. C.; ALKMIM, F. F. D. How Many Rifting Events Preceded the Development of the Araçuaí-West Congo Orogen?. *Geonomos*, [s. l.], 2013.

PRIEST, S. D.; BROWN, E. T. Probabilistic stability analysis of variable rock slopes. [S. l.]: *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, 1983.

READ, J.; PETER, S. (org.). *Guidelines for open pit slope design*. Reprint. with corred. Collingwood, Vic: CSIRO Publ. [u.a.], 2009.

RENGER, F. E. *et al.* Evolução Sedimentar do Supergrupo Minas: 500 Ma. de Registro no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Geonomos, [s. l.], 1994.

RENÓ, R.; GONTIJO, A. A.; HERRERA, J. A. C. Procedimento Operacional de Mapeamento Geomecânico em Escavações Subterrâneas. [s. l.], 2014.

ROSIÈRE, C. A.; CHEMALE JR, F. Itabiritos e Minérios de Ferro de Alto Teor do Quadrilátero Ferrífero - Uma visão geral e discussão. Geonomos, [s. l.], 2000.

ROSIÈRE, C. A.; RIOS, F. J.; KUCHENBECKER, M. O Quadrilátero Ferrífero: Uma Província Mineral de Classe Mundial. *In: GEOLOGIA DO CONTINENTE SUL-AMERICANO: EVOLUÇÃO DA OBRA DE FERNANDO FLÁVIO MARQUES DE ALMEIDA*. 1. eded. São Paulo, SP, Brasil: Beca, 2010.

SANTOS, Á. R. dos. Geologia de Engenharia: Conceitos, Métodos e Prática. 3. ed. [S. l.]: Nome da Rosa, 2017.

SCHORSCHER, H. D. *et al.* Quadrilátero Ferrífero-Minas Gerais State: Rio das Velhas greenstone belt and Proterozoic rocks. Intern. Symp. Early Arch. Prot., Salvador, Excur. Annex. [s. l.], p. 46, 1982.

SPENCER, E. A Method of analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Inter-Slice Forces. *Géotechnique*, [s. l.], v. 17, n. 1, p. 11–26, 1967.

STACEY, P.; MARTIN, D. (org.). Guidelines for open pit slope design in weak rocks. Leiden, The Netherlands: CRC Press/Balkema, 2018.

ULUSAY, R.; HUDSON, J. A. (org.). The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006. April 2007 eded. Ankara, Turkey: Commission on Testing Methods, International Society of Rock Mechanics, 2007.

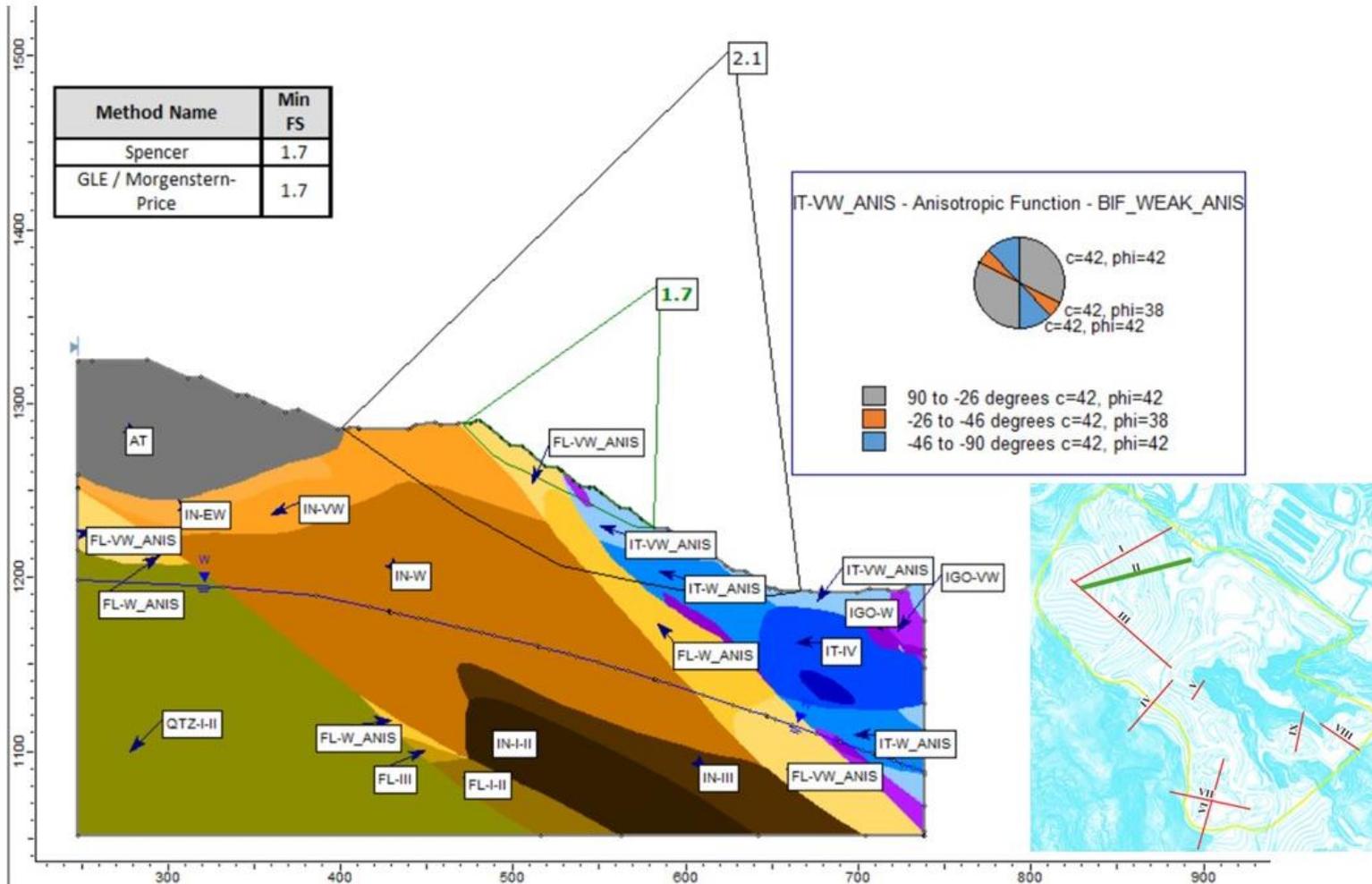
VALLEJO, L. I. G. de *et al.* (org.). Ingeniería Geológica. Madrid: Pearson Educación, 2002.

WESSELOO, J.; READ, J. Acceptance Criteria. *In: GUIDELINES FOR OPEN PIT SLOPE DESIGN*. Reprint. with corred. Collingwood, Vic: CSIRO Publ. [u.a.], 2009. p. 221–236.

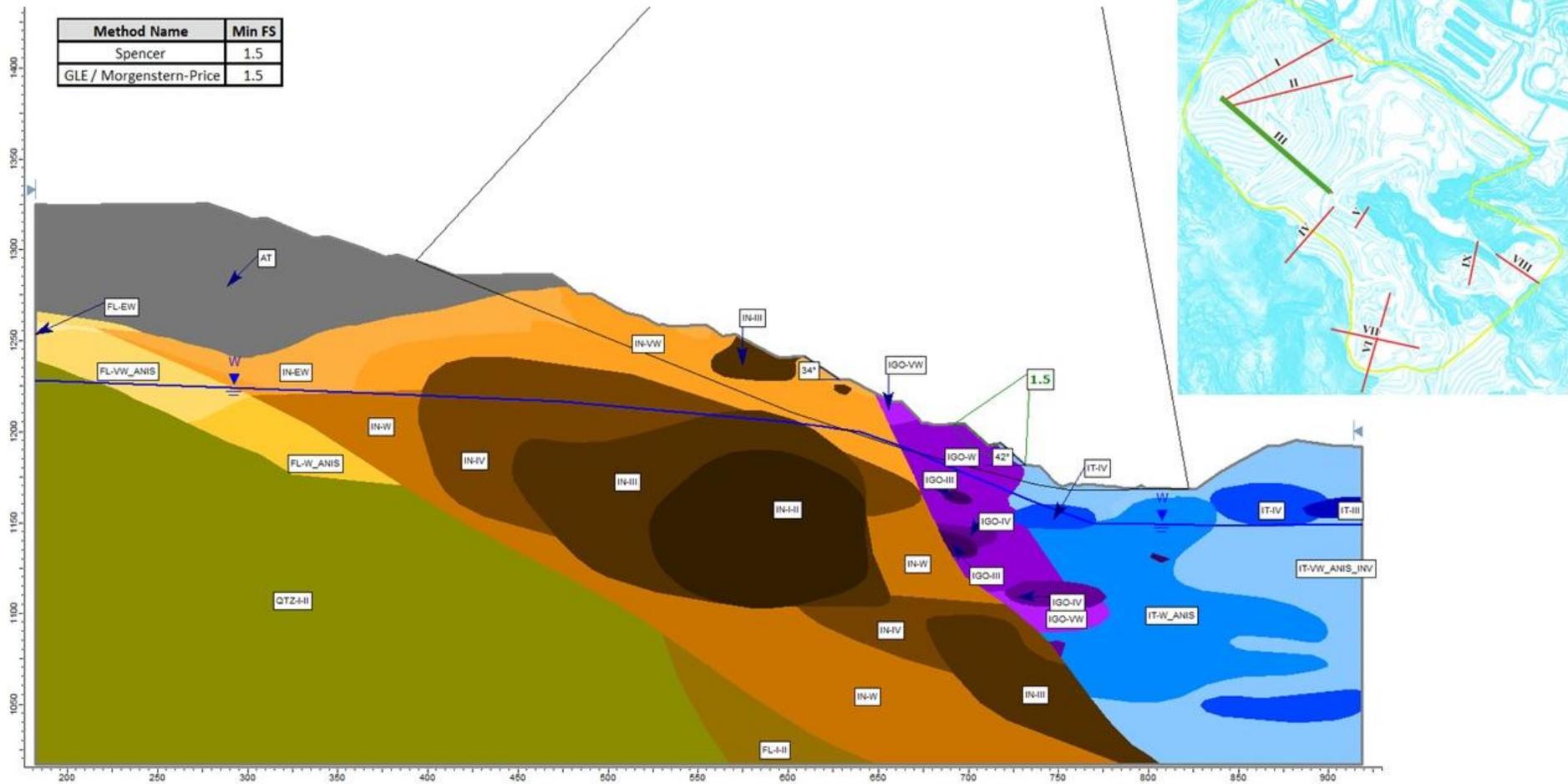
WYLLIE, D. C.; MAH, C. W. Rock slope engineering: civil and mining. 4. ed. London; New York: Spon Press, 2004.

APÊNDICE A – SEÇÕES ANALISADAS

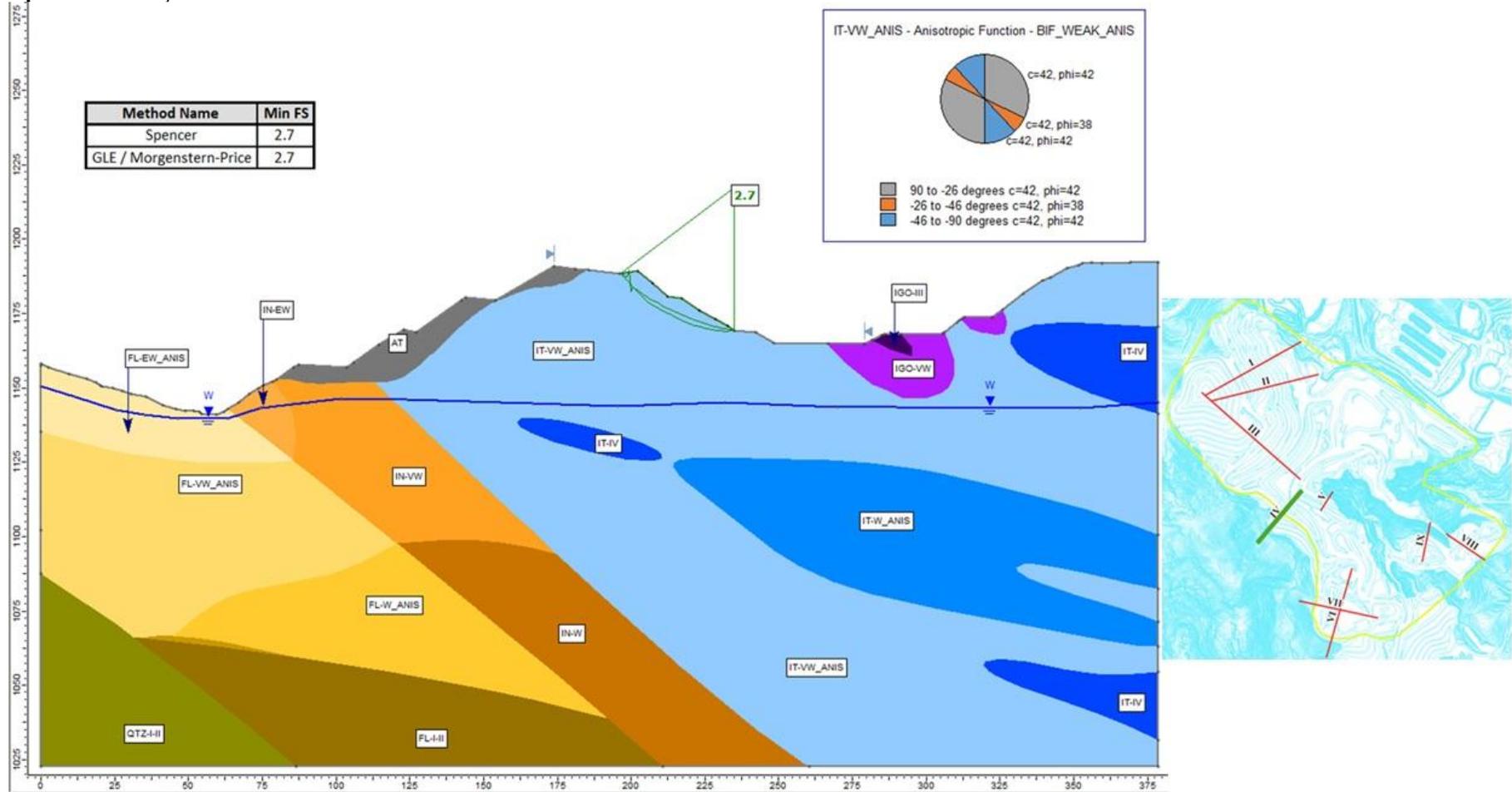
Apêndice i- Seção II.



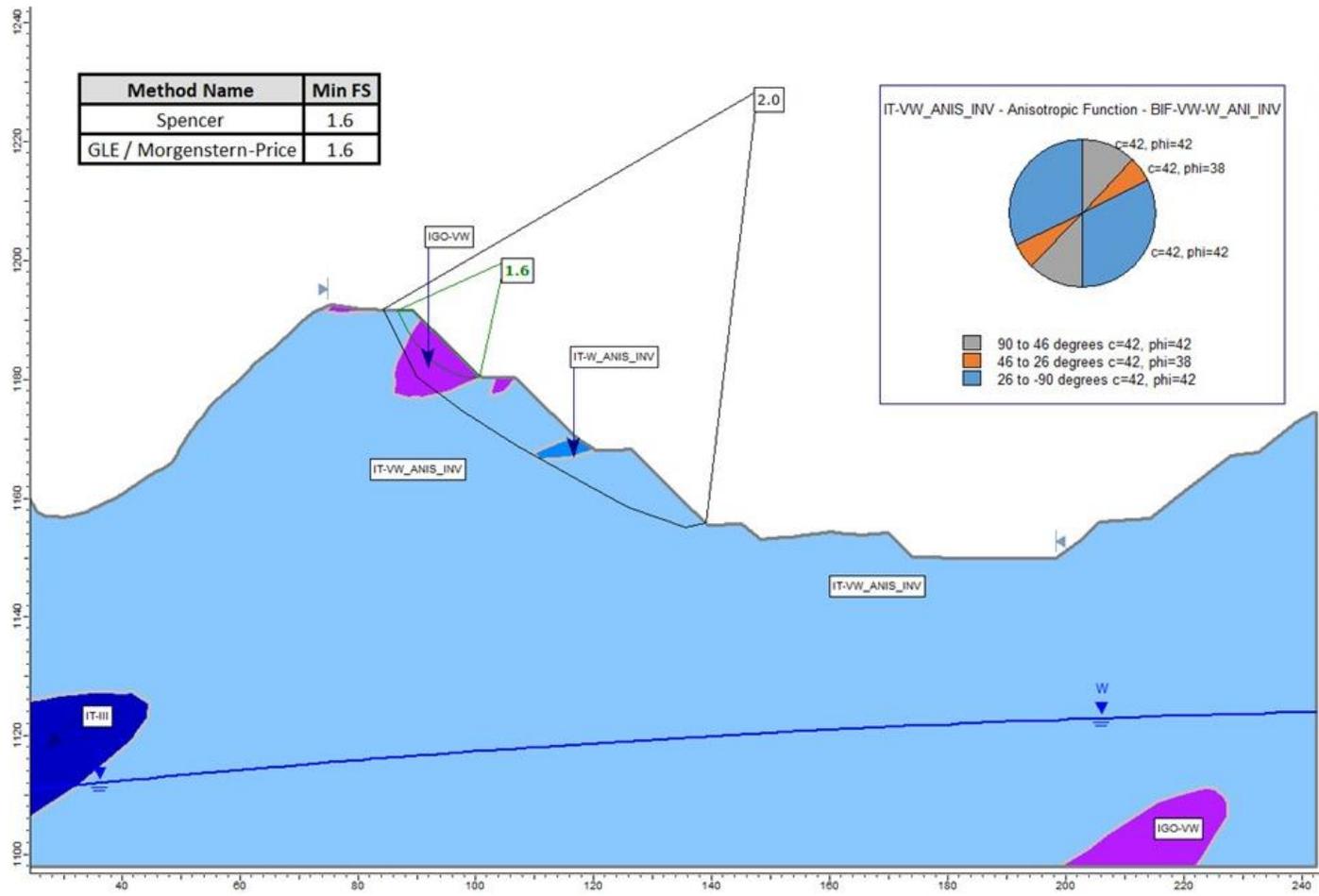
Apêndice ii - Seção III.



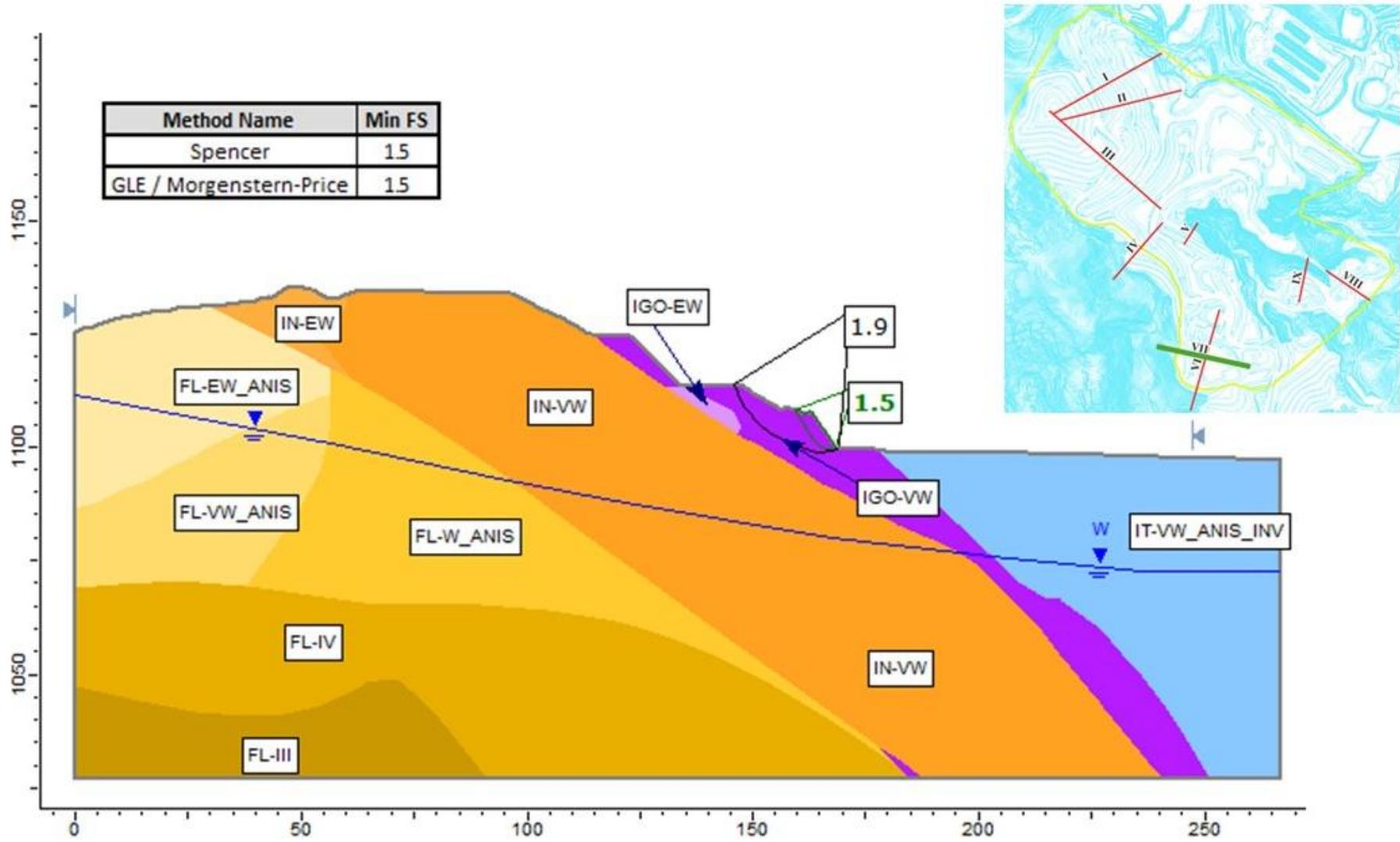
Apêndice iii - Seção IV.



Apêndice iv - Seção V.



Apêndice v - Seção VII.



Apêndice vi - Seção VIII.

