



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
REGIONAL GOIÂNIA

FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

FCT
Faculdade de
Ciência e Tecnologia



UFG
UNIVERSIDADE
FEDERAL DE GOIÁS



LAVOISIER MATIAS DOS SANTOS

**MAPEAMENTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO:
MINA DE BARRO ALTO – GO, ANGLO AMERICAN**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC no 1240/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei no 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo dos Trabalhos de Conclusão dos Cursos de Graduação disponibilizado no RI/UFG é de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminhar(em) o produto final, o(s) autor(a)(es)(as) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG)

Nome: Lavoisier Matias dos Santos

Título do trabalho: MAPEAMENTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO: MINA DE BARRO ALTO – GO, ANGLO AMERICAN

2. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador) Concorda com a liberação total do documento [X] SIM [] NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante: a) consulta ao(à)(s) autor(a)(es)(as) e ao(à) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo do TCCG. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro.

Obs.: Este termo deve ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Sérgio Willians De Oliveira Rodrigues, Professor do Magistério Superior**, em 27/10/2022, às 10:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **LAVOISIER MATIAS DOS SANTOS, Discente**, em 27/10/2022, às 12:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3264439** e o código CRC **646329A8**.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
REGIONAL GOIÂNIA

LAVOISIER MATIAS DOS SANTOS

FCT
Faculdade de
Ciência e Tecnologia



UFG
UNIVERSIDADE
FEDERAL DE GOIÁS



**MAPEAMENTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO:
MINA DE BARRO ALTO – GO, ANGLO AMERICAN**

Projeto de pesquisa apresentado como requisito parcial para elaboração do Trabalho de Conclusão de curso.

Orientador: Sérgio Wilians de Oliveira Rodrigues
Coorientador: Paola Bruno Arab

Aparecida de Goiânia
2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Santos, Lavoisier Matias dos
Mapeamento geológico-geotécnico [manuscrito] : Mina de Barro Alto - GO, Anglo American / Lavoisier Matias dos Santos. - 2022.
113 f.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Wilians de Oliveira Rodrigues; co orientadora Dra. Paola Bruno Arab.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Goiás, Campus Aparecida de Goiânia, Geologia, Aparecida de Goiânia, 2022.

Bibliografia. Apêndice.

Inclui siglas, mapas, fotografias, abreviaturas, símbolos, gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Mapeamento geológico. 2. Geotecnia. 3. Mina Barro Alto. I. Rodrigues, Sérgio Wilians de Oliveira, orient. II. Título.

CDU 55



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Ao 14º dia do mês de outubro do ano de 2022 iniciou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “MAPEAMENTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO: MINA DE BARRO ALTO – GO, ANGLO AMERICAN”, de autoria de Lavoisier Matia dos Santos, do curso de Geologia, da Faculdade de Ciências e Tecnologia da UFG. Os trabalhos foram instalados pelo Professor Doutor Sérgio Willians de Oliveira Rodrigues da Faculdade de Ciências e Tecnologia -UFG, com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor Filipe Altoé Temporim da Faculdade de Ciências e Tecnologia - UFG e Professora Doutora Martha Noélia Lima da Faculdade de Ciências e Tecnologia -UFG. Após a apresentação, a banca examinadora realizou a arguição do(a) estudante. Posteriormente, de forma reservada, a Banca Examinadora atribuiu a nota final de nove e meio (9,5), tendo sido o TCC considerado aprovado.

Proclamados os resultados, os trabalhos foram encerrados e, para constar, lavrou-se a presente ata que segue assinada pelos Membros da Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Sérgio Willians De Oliveira Rodrigues, Professor do Magistério Superior**, em 14/10/2022, às 15:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Filipe Altoe Temporim, Professor do Magistério Superior**, em 14/10/2022, às 15:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Paola Bruno Arab, Professora do Magistério Superior**, em 14/10/2022, às 15:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Martha Noélia Lima, Professora do Magistério Superior**, em 14/10/2022, às 16:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3264154** e o código CRC **085C35D0**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por sempre ter me guiado pelo caminho da verdade e da justiça, me dando forças para prosseguir, mesmo diante de situações adversas.

À toda minha família, em especial meus pais, Teodora F. Santos e Osmar M. Souza, que me educaram com valores inegociáveis de ética, cuidado e respeito. Infelizmente, meu pai não está mais entre nós, mas tenho certeza de que de algum lugar está vibrando de alegria com essa conquista - como sempre fez diante de cada passo dado por seus filh@s.

Aos meus irmãos, Lidiany M. Santos e Lildemar M. Santos que, apesar da distância, sempre se mostraram presentes, me apoiando e incentivando. E à minha sobrinha e afilhada que, apesar da pouca idade, me ensina muito sobre os verdadeiros significados das palavras família e simplicidade.

A tod@s colaboradores da Universidade Federal de Goiás, em especial os meus professores e/ou orientadores Sérgio e Paola. Fiquem certos de que o profissionalismo, ensinamentos, parceria e sacrifícios que fizeram foram fundamentais para alcançar o objetivo desse projeto. Profissionais exemplares, e que fizeram a diferença na minha vida, pessoal e profissional.

A tod@s da Anglo American, operação e corporativo, pelo apoio ao projeto e às atividades de campo. Principalmente aos colaboradores que me acompanharam nas atividades do mapeamento geológico-geotécnico: Alessandro, Alípio, Eliete, Igor, Kessy, Marcos, Márcio, Talis e Wesley. Estendo os agradecimentos ao meu amigo e colega de profissão, Mikael V. Azevedo. Pelos ensinamentos e orientações acerca da geologia e minério da mina de Barro Alto - GO.

Aproveito a oportunidade para agradecer ao Jomar S. Farias e Everton B. Alexandre, pelos ensinamentos, bons exemplos e pelas diversas vezes que me incentivaram a buscar os meus objetivos. É fácil perceber que seus valores estão em sintonia com os da Anglo American, e vem contribuindo fortemente com o seu propósito - Reimaginar a mineração para melhorar a vida das pessoas.

Nesta oportuna ocasião, estendo os meus cumprimentos a tod@s os meus amigos e colegas de profissão, Técnic@s em Mineração. Profissionais que são peças fundamentais nos empreendimentos minerários e que contribuem de forma

efetiva para o desenvolvimento da mineração no Brasil e no exterior. Em especial, gostaria de registrar meus sinceros agradecimentos ao colega de profissão e amigo Deberson R. Lima por todas as conversas sobre geotecnia que tivemos nesse último ano.

Por último, mas não menos importante, gostaria de agradecer minha querida companheira, Marcella O. Schult. Uma mulher guerreira e que esteve ao meu lado durante toda essa jornada, que foi mais longa do que o previsto. Por ter sido o meu ponto de equilíbrio nas horas difíceis e discordado da minha opinião quando se fez necessário. Fique certa de que essa etapa da minha vida teria sido muito mais difícil sem você ao meu lado. Te Amo!!!

“A única coisa que a UFG pede é que vocês tenham o compromisso de fazer justiça social com o diploma que têm”.

Edward Madureira

RESUMO

O Complexo Máfico-Ultramáfico Barro Alto integra o Maciço de Goiás, que está inserido no contexto geológico da Província Tocantins. As deformações associadas a amalgamação do Gondwana, gerou, na área de estudos, uma série de estruturas e fase de deformação. É caracterizada uma xistosidade (S_1) subparalela ao bandamento composicional (S_0). Também são observados padrões de redobramento do tipo bumerangue associados a mecanismos de deslizamento flexural. Conjuntamente, são observados um sistema de fraturas NE-SW e NW-SE compatíveis com modelos idealizados de fraturamento associado a dobramento cilíndrico por flexura.

O depósito de níquel supergênico de Barro Alto é composto por unidades litológicas derivadas de rochas ultrabásicas - dunito-serpentinizado, *boulder* de dunito, minério básico, minério ácido, minério ferruginoso, estéril interno, calcedônia *soft*, calcedônia *hard* e solo laterítico.

A extração do níquel em Barro Alto é caracterizada por lavra a céu aberto (*Open Pit*), que consiste em escavação do solo ou rocha branda e consequente modificação da topografia. Essas modificações devem ser tecnicamente planejadas, de forma a otimizar recursos e aumentar os índices de segurança.

Maciços heterogêneos saprolitizados são compostos por feições estruturais reliquias, blocos de rochas imersos no perfil intemperizado (*bedrock*) e zonas irregulares com intemperismo contrastante. Essas heterogeneidades costumam controlar os mecanismos e locais de falhas, assim como o fator de segurança.

Para esse trabalho, além das boas práticas internas, a caracterização geológico-geotécnica foi realizada com base nas recomendações sugeridas pela ISRM e nos critérios estabelecidos pelo sistema de classificação maciço rochoso RMR (Bieniawski, 1989).

A caracterização geológica-geotécnica indicou um maciço bastante heterogêneo e anisotrópico. Além disso, a análise cinemática simples realizada como estudo preliminar obteve índices superiores a 0,1 (10%) para rupturas do tipo planar e cunha.

PALAVRAS CHAVES: 1. Mapeamento Geológico. 2. Geotecnia. 3. Mina Barro Alto

ABSTRACT

The Barro Alto Mafic-Ultramafic Complex is part of the Goiás Massif, which is inserted in the geological context of the Tocantins Province. The deformations associated to the amalgamation of Gondwana generated in the study area a series of structures and deformation stages. A schistose (S_1) subparallel to the compositional banding (S_0) is characterized. Boomerang-like refolding patterns associated with flexural slip mechanisms are also observed. Conjunctively, a NE-SW and NW-SE fracture system compatible with idealized fracturing models associated with cylindrical flexural folding are observed.

The Barro Alto supergene nickel deposit is composed of lithological units derived from ultrabasic rocks - dunite-serpentinized, dunite boulder, base ore, acid ore, ferruginous ore, internal waste rock, soft chalcedony, hard chalcedony and laterite soil.

Nickel extraction in Barro Alto is characterized by open pit mining, which consists of excavation of the soil or soft rock and consequent modification of the topography. These modifications must be technically planned, in order to optimize resources and increase safety levels.

Saprolitized heterogeneous massifs are composed of reliquary structural features, rock blocks immersed in the weathered profile (bedrock), and irregular zones with contrasting weathering. These heterogeneities usually control the failure mechanisms and locations, as well as the factor of safety.

For this work, in addition to good internal practices, the geological-geotechnical characterization was carried out based on the recommendations suggested by the ISRM and the criteria established by the RMR rock mass classification system (Bieniawski, 1989).

The geological-geotechnical characterization indicated a rather heterogeneous and anisotropic massif. Furthermore, the simple kinematic analysis performed as a preliminary study obtained indices higher than 0.1 (10%) for planar and wedge type ruptures.

KEYWORDS: 1. Geological Mapping. 2. Geotechnics. 3. Barro Alto Mine

Índice de abreviaturas

A1P4F1	Área 1 – <i>Pit</i> 4 – Frente 1
CH	Calcedônia <i>hard</i>
CS	Calcedônia <i>soft</i>
GSI	Geological Strength Index
ISRM	International Society for Rock Mechanics
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
JCS	Resistência à compressão simples das paredes
JRC	Coefficiente de rugosidade
MCT	Miniatura, Compactada, Tropical
SPMB	Minério Básico
SPMA	Minério Ácido
SPMF	Minério Ferruginoso
RQD	Rock Quality Designation
Q	Quality
GSI	Geological Strength Index
$R_{E/M}$	Relação Estéril / Minério
RQD	Sistemas Rock Quality Designation
RMR	Rock Mass Rating
PTO	Plain Type Ore
ETO	East Type Ore
WTO	West Type Ore
UTM	Universal Transversa de Mercator

Índice de ilustrações

Figura 1: Fluxograma das fases do trabalho de conclusão de curso.	2
Figura 2: Área de estudo. A - Observação em detalhe da área de estudo destacada em roxo; B - Mapa de localização.....	5
Figura 3: Gráfico de monitoramento hídrico - Altitude x Pluviometria x Tempo... 6	
Figura 4: Sub-bacia da cidade de Barro Alto-GO inserida no contexto da bacia do rio Tocantins.....	9
Figura 5: Colagem orogênica envolvendo os núcleos cratônicos Amazônico, São Franciscano e Paranapanema. Modificado de Fernandes (2019).....	10
Figura 6: Mapa geológico da Província Tocantins, com destaque para os Complexos Máfico-Ultramáfico (modificado de Filho <i>et al.</i> , 2010).....	12
Figura 7: A- Mapa geológico esquemático da região de Ceres, Goianésia e Barro Alto; B – Seção geológica esquemática; C – Coluna estratigráfica do Complexo Barro Alto (Modificado de Filho <i>et al.</i> , 2010).	14
Figura 8: Variação dos teores de níquel de acordo com o perfil de alteração: saprólito grosso, coerente e homogêneo, resultado da substituição de olivina por esmectita; saprólito argiloso, caracterizado pela perda de coesão e substituição da serpentina por nontronita (Fe-esmectita); saprólito ferruginoso, no qual os Fe-silicatos foram substituídos por hidróxidos de ferro (nontronita passa para goetita); passagem para o horizonte laterítico marcada pela desestruturação dos saprólitos e ingresso de goetita (Anglo American).	15
Figura 9: Perfil laterítico de Barro Alto organizado de acordo com a topografia. (modificado Anglo American).	16
Figura 10: Vista da área de estudo, através de imagens aéreas obtidas por drone, e subdivisão proposta para o mapeamento. A – Perfil de intemperismo típico do depósito; B - Vista em planta da área de estudo; C - Vista em perfil segundo direção SW-NE.	17
Figura 11: A - <i>Boulder</i> de dunito de ± 15m de altura e geometria irregular; B - <i>Boulder</i> de dunito caracterizado por intenso fraturamento preenchido com pegmatito (Ponto 48); C - <i>Boulder</i> com fraturas preenchidas por garnierita (Ponto 123).	18
Figura 12: Minério básico, apresentando coloração verde-amarelada (Ponto 138).	19
Figura 13: Diferentes aspectos do minério ácido. Minério ácido encaixado em calcedônia (A – Ponto 155 e B – Ponto 100); C – Bloco de calcedônia imerso ao minério ácido (Ponto 102); D – Minério ácido de coloração verde-avermelhado (Ponto 151).....	20
Figura 14: A – Corpo de minério ferruginoso sob calcedônias (Ponto 30); B – Coloração típica do minério ferruginoso (Ponto 113); C – Minério ferruginoso apresentando fino bandamento (Ponto 163).	21
Figura 15: A – Talude composto por calcedônia <i>hard</i> , marrom-avermelhada e com alta resistência (Ponto 31); B – Foto em detalhe da calcedônia <i>hard</i> ; C – Talude composto por calcedônia <i>soft</i> marrom-amarelada, caracterizada por blocos porosos imersos em uma matriz de granulometria variando entre areia fina e silte (Ponto 164); D – Foto de detalhe da calcedônia <i>soft</i> , com porosidade incipiente e venulação bem marcada.	22
Figura 16: Fina cobertura de solo laterítico (Ponto 120).	23

Figura 17: A – Fotointerpretação através de imagem de radar; B – Interpretação de lineamentos através de dados magnetométricos (Anglo American).....	25
Figura 18: Afloramento representativo do nível de base, mostrando as relações hierárquicas das estruturas mapeadas na área de estudo.....	26
Figura 19: Estereogramas em semi-esfera inferior com isofrequência de contagem e autovetores (1,2 e 3) de Woodcock (1977) da xistosidade (S_1) para os setores da cava: A – Topo (Calcedônias); B – Intermediário (saprólito); C – Base (Dunito e Boulder de Dunito) e D – Total.	28
Figura 20: Estereogramas em semi-esfera inferior com isofrequência de contagem e autovetores (1,2 e 3) de Woodcock (1977) da clivagem (S_2).	29
Figura 21: Estereogramas em semi-esfera inferior com isofrequência de contagem e autovetores (1,2 e 3) de Woodcock, (1977), em comparação aos diagramas de rosetas (A, B, C e D).....	30
Figura 22: Estruturas mapeadas em diferentes pontos e estágios de intemperismo. A – Minério Básico (Ponto 48); B – <i>Boulder</i> (Ponto 37); C – Minério Ácido (Ponto 17); D – Afloramento de calcedônia caracterizada por fraturas NW-SE (Ponto 72); E – Calcedônia hard caracterizada por fraturamento preenchido (Ponto 146); F – Calcedônia Soft caracterizada por fratura preenchida por argilominerais e direção N-S (Ponto 216).....	31
Figura 23: Padrões de fraturas, juntas e estruturas menores associadas (estilólitos) ao desenvolvimento de sistema de dobramento cilíndrico (modificado de McCLAY, 1987).	32
Figura 24: Estruturas rúpteis e cinemática interpretada da área de estudo. A) Plano de falha com desenvolvimento de <i>slinksides</i> . Na figura são observadas dois conjuntos de <i>slinksides</i> . Um com alta obliquidade ($\sim 90^\circ$) e outro com obliquidade média ($\sim 45^\circ$). B) Veios sigmoidais (<i>tension gashes</i>) indicando cinemática com transporte de topo para SW. C) Diagrama de rosetas da direção das fraturas da área de estudo. Indicando as direções principais de fraturamento NE-SW (em verde) e NW-SE (vermelho). D) Estereogramas em semi-esfera inferior com isofrequência de contagem e autovetores (1,2 e 3) de Woodcock, 1977 da xistosidade (S_1).....	34
Figura 25: Superfícies espelhadas e estriadas em rocha altera. A – ponto 133; B- ponto 67, C – ponto 127; D – ponto 119.	35
Figura 26: Elementos geométricos do talude de mina a céu aberto (modificado de Charbel, 2008).....	36
Figura 27: Variação da <i>REM</i> a partir da alteração do ângulo global do talude (modificado de Charbel, 2008).	37
Figura 28: Modelo proposto para falhas em saprólitos, baseado na força relativa e proporção de blocos inseridos no perfil intemperizado (West <i>et al.</i> ,1991).	39
Figura 29: Caracterização de Feições Estruturais (modificado ISRM, 2007-2014).	45
Figura 30: Orientação ou atitude de uma descontinuidade no espaço (ISRM, 1978)	46
Figura 31: Perfis de rugosidade comparativo com a aparência da superfície da descontinuidade e o valor do JRC correspondente (Barton,2021).	49
Figura 32: <i>JRC</i> 20 e <i>JRC</i> 100 correspondem o valor estimado para o índice de rugosidade levando em consideração um comprimento de 20 cm e de 100 cm (Barton, 2021).	50

Figura 33: Estimação dos valores de GSI baseada nas condições geológicas do maciço rochoso (Hoek & Brown 1997).....	55
Figura 34: Afloramento de dunito parcialmente serpentinizado e, ao lado, plotagem dos valores atribuídos para o GSI (Ponto 6).....	57
Figura 35: Afloramento de <i>boulder</i> e, ao lado, plotagem dos valores atribuídos para o GSI (Ponto 5).	58
Figura 36: Afloramento de <i>boulder</i> e, ao lado, plotagem dos valores atribuídos para o GSI (Ponto 195).	59
Figura 37: Minério ácido, friável, acondicionado em superfície dobrada de calcedônia (Ponto 61).	60
Figura 38: Estruturas reliquias em minério ácido. A – ponto 17; B – ponto 84; C – ponto 151.....	61
Figura 39: Minério Ferruginoso em estado de alteração avançada e baixa resistência. A – ponto 163; B – ponto 33.....	62
Figura 40: A – Vista em planta da área; B – Vista em perspectiva; C – Contato solo-rocha caracterizado por descontinuidade persistente e abertura de 10 cm (Ponto 226).....	63
Figura 41: A – vista em planta da área; B – deslizamento na porção NE da cava (Ponto 192).....	64
Figura 42: Descontinuidades em calcedônia e, ao lado, plotagem dos valores atribuídos para o GSI (Pontos 146 e 147).....	65
Figura 43: Calcedônia soft (Ponto 216).....	66
Figura 44: Cobertura orgânica com pequena fração de laterita.	67
Figura 45: Ruptura do tipo planar, cunha e tombamento (Modificado de Neyra, 2006).	69
Figura 46: Critérios simplificados para a análise cinemática. a- ruptura planar, b- ruptura por tombamento, c- Ruptura em cunha (Hoek & Bray, 1977). Nos estereogramas, P = pólos dos planos; f = face do talude; ψ_f = ângulo de mergulho do talude; ψ_i = ângulo de mergulho da linha de interseção e ϕ = ângulo de atrito (Neyra, 2006).	71
Figura 47: Análise cinemática simples. Para a face de talude, temos: A.I-III = 150/60; BI-III = 170/60; CI-III = 192/60.	72

Índice de Tabelas

Tabela 1: Estado de intemperismo para maciços rochosos.....	41
Tabela 2: Classificação da propriedade de coerência da rocha.	42
Tabela 3: Classificação da propriedade de resistência da rocha.....	43
Tabela 4: Descrição do espaçamento das descontinuidades.	47
Tabela 5: Descrição da persistência.....	47
Tabela 6: Descrição das aberturas.....	51
Tabela 7: Classificação dos maciços em função do RQD.	52
Tabela 8: Classes de maciços.....	54
Tabela 9: Parâmetros caracterizados durante o mapeamento.	56
Tabela 10: Principais características das unidades mapeadas.....	67
Tabela 11: Resultados das análises para ruptura planar, cunha e tombamento.	72
Tabela 12: Os valores para o espaçamento é a média das medidas registradas em campo. Com relação ao espaçamento, foi variação média para todas as unidades entre 0,1 a 2000 cm.	74

Sumário

1. Introdução	1
1.1. Metodologia.....	2
1.1.1. Pesquisa Bibliográfica.....	2
1.1.2. Mapeamento, Tratamento e Armazenamento dos Dados	3
1.1.3. Análise e Interpretação dos Dados	4
1.1.4. Redação e Produtos	4
2. Área de Estudo.....	5
2.1. Localização e Acesso.....	5
2.2. Clima, Geomorfologia e Pedologia.....	6
2.3. Contexto geológico regional e local.....	9
2.3.1 Geologia regional	9
2.3.2. Geologia local.....	12
3. Geologia da Área 1 – <i>Pit 4</i> – Frente 1 (A1P4F1).....	16
3.1. Base do Perfil de Intemperismo	17
3.2. Porção Intermediária do Perfil de Intemperismo	18
3.3. Topo do Perfil de Intemperismo	21
3.4. Geologia Estrutural da Área A1P4F1	23
3.5. Compartimentação do Maciço e Estabilidade de Taludes.....	35
3.5.1. Estabilidade de Maciços Intemperizados	37
4. Comportamento Geomecânico de Maciços Rochosos.....	40
4.1. Rocha intacta	40
4.1.1. Gênese e/ou litologia.....	41
4.1.2. Alteração	41
4.1.3. Coerência	42
4.2. Descontinuidades e suas características	44
4.2.1. Orientação.....	45
4.2.2. Espaçamento	46
4.2.3. Persistência.....	47
4.2.4. Resistência das paredes	48
4.2.5. Rugosidade (Jr).....	48
4.2.6. Preenchimento	51
4.2.7. Abertura.....	51
4.2.8. Percolação	51
4.3. Sistemas de Classificação Geomecânica.....	51
4.3.1. Sistema RQD	52
4.3.2. Sistema RMR	53

4.3.3. Geological Strength Index (GSI).....	54
4.4. Caracterização Geológico-Geotécnica.....	55
4.4.1. Dunito.....	56
4.4.2. <i>Boulder</i> – BDD.....	57
4.4.3. Minério Básico – SPMB.....	58
4.4.4. Minério Ácido – SPMA.....	59
4.4.5. Minério Ferruginoso – SPMF.....	61
4.4.6. Calcedônias.....	63
4.5. Análise Cinemática.....	68
5. Resultados e Discussões.....	73
6. Conclusões.....	75
7. Sugestões para trabalhos futuros.....	76
8. Referências bibliográficas.....	78
Apêndice A – Análise Cinemática.....	83
A1: Planar - Atitude 150/60.....	83
A2: Cunha: 150/60.....	84
A3: Tombamento - Atitude 150/60.....	85
A4: Planar - Atitude 170/60.....	86
A5: Cunha - Atitude 170/60.....	87
A6: Tombamento - Atitude 170/60.....	88
A7: Tombamento - Atitude 192/60.....	89
A8: Cunha - Atitude 192/60.....	90
A9: Tombamento - Atitude 192/60.....	91
Apêndice B – Tabelas.....	87
Tabela B-1:.....	87
Tabela B-2: Parâmetros de classificação e seus valores.....	88
Apêndice C – Mapa de Pontos.....	89
Apêndice D – Mapa Geológico-Geotécnico.....	90
Apêndice E – Seções Geológicas-Geotécnicas.....	91

1. Introdução

Os complexos máficos-ultramáficos acamadados são estruturas de grande interesse científico e econômicos em todo o mundo, principalmente pelo destaque na prospecção e/ou produção de metais básicos e Elementos do Grupo da Platina (EGP). No Brasil, os complexos de Niquelândia e Barro Alto, que se alinham com o complexo de Cana Brava, merecem destaque pelas atividades mineiras já existentes (LIMA, 2010).

A Anglo American, presente no Brasil desde 1973, iniciou suas operações para exploração do depósito supergênico de níquel laterítico em 1982 com a Codemin, em Niquelândia - GO. Posteriormente, após encerrar parcialmente as atividades em Niquelândia, em 2004 iniciou-se a operação de Barro Alto - GO onde o minério extraído abastece a planta de beneficiamento de Barro Alto e Niquelândia (Anglo American).

Apesar da heterogeneidade do minério da mina de Barro Alto, os procedimentos operacionais para extração do níquel laterítico são muito bem definidos, buscando atender, de acordo com a prioridade de lavra, os planejamentos de longo, curto e curtíssimo prazo.

A lavra de mina a céu aberto é caracterizada por escavações em solo ou rocha que, por consequência, resulta na modificação da topografia do terreno. Tal modificação, deve ser tecnicamente planejada de forma a otimizar recursos e evitar movimentações de massa, durante a atividade mineira e, após a exaustão da mina, quando se tem o talude final de mina (Charbel, 2008).

O principal objetivo deste trabalho foi a elaboração de um mapeamento geológico-geotécnico de uma área restrita e com os riscos controlados. No mapeamento foram enfatizados dados de geologia estrutural, aliada com parâmetros relacionados à parte de critérios de drenagem, que dominam condições de estabilidade, tanto para as unidades objetos de lavra, quanto para a geometria de projeto definida para os planos de lavra.

O mapeamento, então, teve o intuito de definir zonas com maiores susceptibilidades a processos de rupturas e erosões, que estão intimamente associados à condicionante estrutural sobreposta nos materiais lavrados e também às condições de drenagem, que por vezes desencadeiam processos erosivos e rupturas de diversas magnitudes, que podem criar condições de riscos

geotécnicos interferindo na segurança da operação, podendo, inclusive, paralisar as atividades minerárias em certos locais do empreendimento.

Com a execução deste trabalho, tal mapa pode dar valiosos subsídios para as equipes de operação e planejamento de mina, fazendo com que os planos de lavra e os devidos sequenciamentos possam considerar as condições de riscos associadas às diversas áreas que serão objeto de avanços de lavra pela Anglo American.

1.1. Metodologia

A metodologia aplicada para o desenvolvimento do estudo na mina de Barro Alto - GO segmentou o trabalho em quatro fases: pesquisa bibliográfica; mapeamento, tratamento e armazenamento dos dados; análise e interpretação; redação e produtos. A figura 1 apresenta o fluxograma das fases deste trabalho.

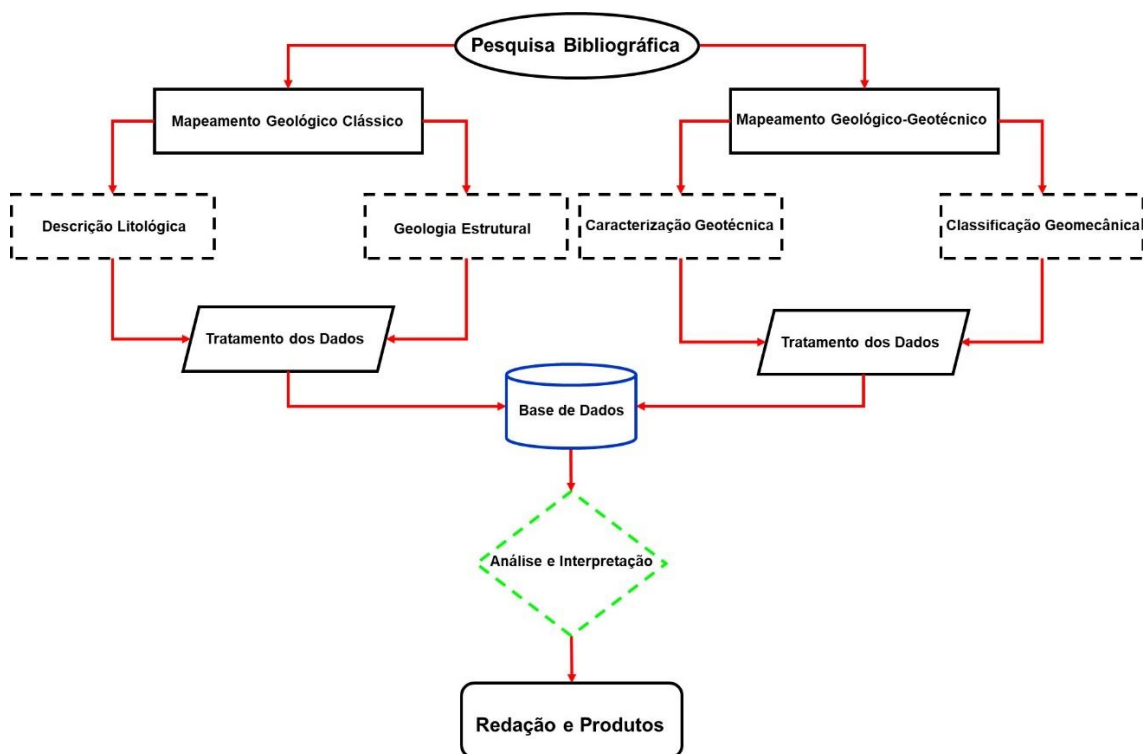


Figura 1: Fluxograma das fases do trabalho de conclusão de curso.

1.1.1. Pesquisa Bibliográfica

A pesquisa bibliográfica consistiu no entendimento da geologia regional e local com base na literatura disponível, prezando pelos trabalhos clássicos que abrange a área de estudo. Posteriormente, a pesquisa bibliográfica consistiu no

levantamento de trabalhos geotécnicos análogos anteriormente realizados e, através de relatório técnico interno, alinhamento dos critérios a serem utilizados neste estudo.

1.1.2. Mapeamento, Tratamento e Armazenamento dos Dados

Mesmo ocorrendo simultaneamente, essa parte do trabalho é dividida em duas etapas: mapeamento geológico clássico e mapeamento geológico-geotécnico.

No mapeamento geológico clássico foi realizada a fotointerpretação dos principais lineamentos regionais, delineados e estudados através de imagens de radar de alta resolução. Tais imagens foram obtidas a partir do Modelo Digital de Terreno de dados ALOS-PALSAR, disponível em <https://www.earthdata.nasa.gov> e interpretado através do *software ArcGis*. Posteriormente, os trabalhos de campo seguiram com a descrição, conforme padrão utilizado na mina, das unidades litológicas e levantamento dos dados estruturais.

A análise estrutural foi realizada com base em procedimentos clássicos (e.g., Hobbs et al, 1976; Ramsay & Huber, 1984, 1987; McClay, 1987) envolvendo a descrição e análise em campo das relações geométricas e cinemáticas das estruturas tectônicas, tomada de atitude de estruturas com bússola, hierarquização destas com base em critérios de superposição, além de tratamento em escritório com o auxílio de estereogramas, seções e mapas.

Para o mapeamento geológico-geotécnico foi aplicada a técnica de mapeamento por janelas, que consiste na caracterização da porção mais representativa dentro de um determinado intervalo geotécnico.

Para esse estudo, foi adotado um padrão de janelas de ± 20 m. Esse tamanho adotado está correlacionado à escala do mapeamento (1:2.000), e foi determinado com base em trabalhos anteriores realizados pela empresa e no tamanho da área de estudo. É importante ressaltar que, em alguns casos, para delimitar os contatos litológicos, foram utilizadas janelas de tamanho menor.

A caracterização geológica-geotécnica de cada janela foi realizada segundo padrão utilizado na mina e nos sistemas de classificação geomecânica: *Rock Quality Designation (RQD)*, *Rock Mass Rating (RMR)* e *Geological Strength Index (GSI)*. Além disso, a descrição dos parâmetros de solo foi realizada de

acordo com a NBR 6502. Alguns aspectos metodológicos da parte geotécnica serão abordados quando for apresentados os resultados obtidos.

Para os trabalhos de campo foram utilizados critérios tátil-visuais, trena, GPS da marca *Garmin* (modelo 64s), bússola geológica da marca *Brunton* (modelo *Geo Pocket Transit -F-5010*), martelo geológico, ácido clorídrico (diluição de ~20%), caneta risca rocha (ponteira de tungstênio), lapiseira, borracha e caderneta de campo. Foi utilizada a declinação magnética 21,8° para oeste na bússola geológica. Ademais, para determinação dos parâmetros de rugosidade das descontinuidades (JRC_{20}), foi utilizado objeto de madeira de 20 cm x 5 cm.

Na última parte do trabalho de campo, as informações levantadas foram revisadas, tratadas e armazenadas em banco de dados. Essa etapa do processo é de extrema importância para garantir a qualidade das informações e confiabilidade dos resultados obtidos.

1.1.3. Análise e Interpretação dos Dados

Os dados adquiridos no trabalho de campo foram integrados com auxílio de planilha Excel da Microsoft, a partir da qual foi possível analisar e interpretar os resultados com base na literatura disponível. Nessa etapa, *software* como *ArcGis* (*Esri*), *AutoCad* (*Autodesk*), *TrackMaker* (*Geo Studio Technology*), *OpenStereo* (*IGc/USP*) e *Stereo 32* (*Ruhr Universtät Brochum*) foram fundamentais na interpretação dos resultados e geração dos produtos deste trabalho.

Ademais, nesta etapa também foi proposta análise cinemática da cava com base em três geometrias diferentes (orientação da face do talude). Para isso, foi utilizado o *software Dips* da *RocScience*.

1.1.4. Redação e Produtos

A partir dos resultados obtidos nas fases anteriores, foram compilados e estão apresentados nesta monografia de conclusão de curso.

Na monografia os principais produtos gerados foram o mapa geológico-geotécnico da região estudada na Mina de Barro Alto (GO). Também foram

produzidos perfis geológicos e outros produtos cartográficos. Estes produtos são apresentados como anexos no final da monografia.

2. Área de Estudo

2.1. Localização e Acesso

A área em questão está inserida no vale do São Patrício, região centro-norte do estado de Goiás, que abrange o território municipal de Barro Alto-GO. A cidade de Barro Alto - GO fica situado a 225 km da capital do estado, Goiânia, e a 217 km de Brasília-DF, conforme figura 02.

O acesso à cidade de Barro Alto, a partir de Aparecida de Goiânia, região metropolitana de Goiânia, pode ser realizado passando primeiramente pela BR-153 para depois seguir na GO-080, rodovia esta que dá acesso à cidade de destino, passando pelos municípios de Anápolis, Jaraguá e Goianésia.

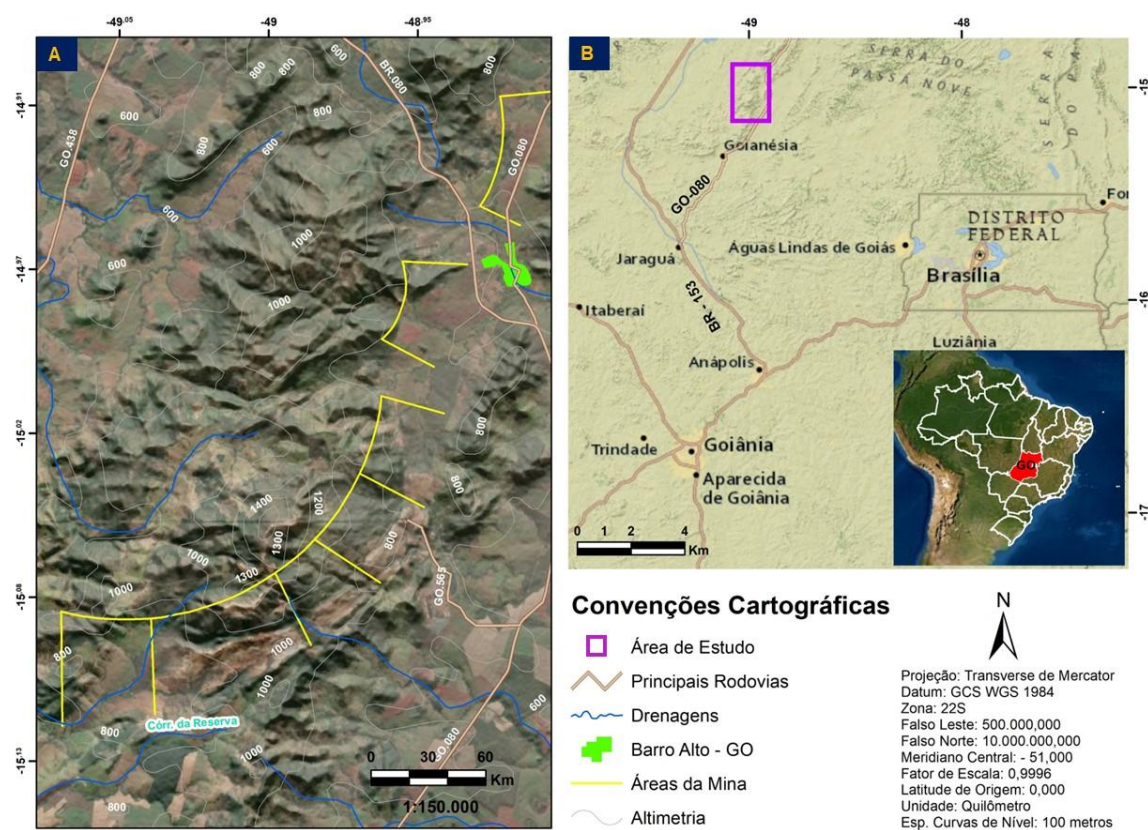


Figura 2: Área de estudo. A - Observação em detalhe da área de estudo destacada em roxo; B - Mapa de localização.

2.2. Clima, Geomorfologia e Pedologia

Localizado na região Centro-Oeste do Brasil, o Estado de Goiás é definido como um importante dispersor de cursos d'água, os quais compõem grandes bacias hidrográficas brasileiras (Nascimento, 1992).

A densidade hidrográfica está associada às diferentes litologias existentes e a disposição dos principais cursos d'água está correlacionada à orogênese brasileira, através do controle exercido pela imposição orográfica de relevos, além de falhas normais de grandes proporções evidenciadas através dos rios Palmeiras, Alto Canabrava e Tocantins (Nascimento, 1992).

A média de precipitação anual do estado é de 1.500 mm (INMET,2022), sendo que 80% é concentrada no período entre novembro e março, conforme gráfico de precipitação da figura 3. A partir destas características, Nimer (1972), classificou o clima do Estado como transicional, clima tropical úmido ou superúmido (Af) e clima tropical, com inverno seco (Aw). Com relação à flora, a vegetação original é predominantemente típica do cerrado que, em geral, se encontra descaracterizada nas partes planas e preservada em regiões com topografias mais acentuadas, acima de 1.000 m (RadamBrasil, 1981).

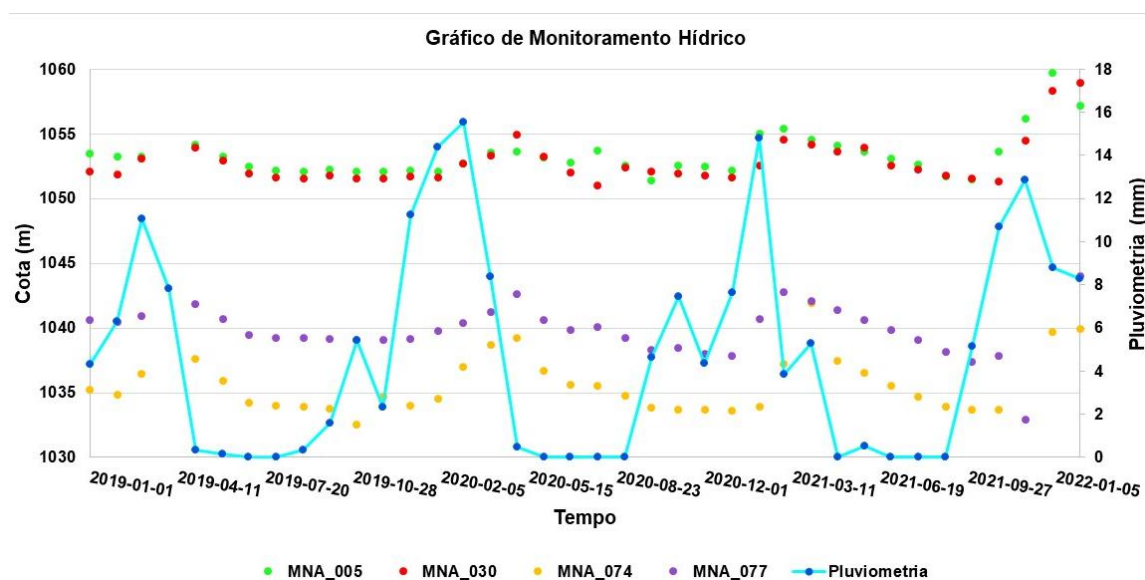


Figura 3: Gráfico de monitoramento hídrico - Altitude x Pluviometria x Tempo.

O estado de Goiás possui variação altimétrica entre 200 – 1.200 m e uma variedade expressiva de aspectos morfológicos, que refletem a diversidade de

fatores que contribuíram para moldar o relevo em tempos pretéritos e atuais, retratando a interação dos processos endógenos e exógenos (Nascimento, 1992). Dentro deste contexto, Nascimento (1992) apresenta uma síntese do Projeto RADAMBRASIL e identifica cinco grandes unidades geomorfológicas e onze subunidades a elas associadas:

- PLANALTO CENTRAL GOIANO:
 - Planalto do Distrito Federal;
 - Planalto do Alto Tocantins-Paranaíba;
 - Planalto Rebaixado de Goiânia;
 - Depressões Intermontanas.

- PLANALTO SETENTRIONAL DA BACIA DO PARANÁ:
 - Planalto de Caiapônia;
 - Planalto de Rio Verde.

- PLANALTO DO DIVISOR SÃO FRANCISCO/TOCANTINS:
 - Patamares do Chapadão.

- DEPRESSÃO DO TOCANTINS:
 - Vão do Paranã;
 - Depressão dos rios Maranhão/Santa Tereza.

- DEPRESSÃO DO ARAGUAIA:
 - Depressão do Rio Araguaia;
 - Planície do Bananal.

O Complexo Barro Alto está localizado no Planalto Central Goiano, na porção central da subunidade Planalto do Alto Tocantins-Paranaíba. Essa subunidade está inserida no contexto da bacia do rio Tocantins e engloba a sub-bacia da cidade de Barro Alto-GO, a figura 4 demonstra a distribuição do território do município dentro de sua bacia.

De acordo com Nascimento (1992), a subunidade Planalto do Alto Tocantins-Paranaíba é composta por intrusões graníticas, caracterizadas por

relevo dômico com semelhanças altimétricas e relevo entre 1.000 e 1.200 m caracterizado por topos truncados e diversidade litológica, sendo um indicativo da ação de processos erosivos físicos em condições climáticas rigorosas (pediplanação) que, de acordo com o Projeto RADAMBRASIL, estão associadas ao Terciário Médio.

Nascimento (1992) ainda afirma que, a subunidade Planalto do Alto Tocantins-Paranaíba é caracterizada por relevo estrutural circular ou alongado, circundado por depressões intermontanas que se prolongam como vales estreitos e de relevo aplainado - cenário semelhante ao descrito pode ser encontrado na região de Barro Alto-GO.

correlacionado a estruturação das faixas orogênicas marginais Araguaia, Paraguai e Brasília - que também compõe a Província Tocantins (Navarro, 2006).

A faixa de dobramentos e empurrões Brasília é a principal unidade da Província do Tocantins e está localizada na borda oeste do Cráton São Francisco, estruturada na direção N-S (Almeida *et al.*, 1981). Possui aproximadamente 1.000 km de comprimento, 200 km de largura nas porções norte/sul e 450 km na região central.

De acordo Almeida *et al.* (1981), a Faixa Brasília demonstra uma evolução complexa, podendo ser dividida em Zona Externa, Zona Interna e suas restritas exposições do Embasamento Granito-Gnáissico, Maciço de Goiás e Arco Magmático (Fuck *et al.* 1994).

O Maciço de Goiás pode ser definido como um fragmento crustal de microcontinente envolvido nos processos finais da orogênese Brasileira (Fuck *et al.* 1994), e engloba terrenos granito-greenstone arqueanos, acrescidos de ortognaisses paleoproterozoicos, sequências metavulcano-sedimentares e complexos máfico-ultramáficos granulitizados (Fuck *et al.* 1994).

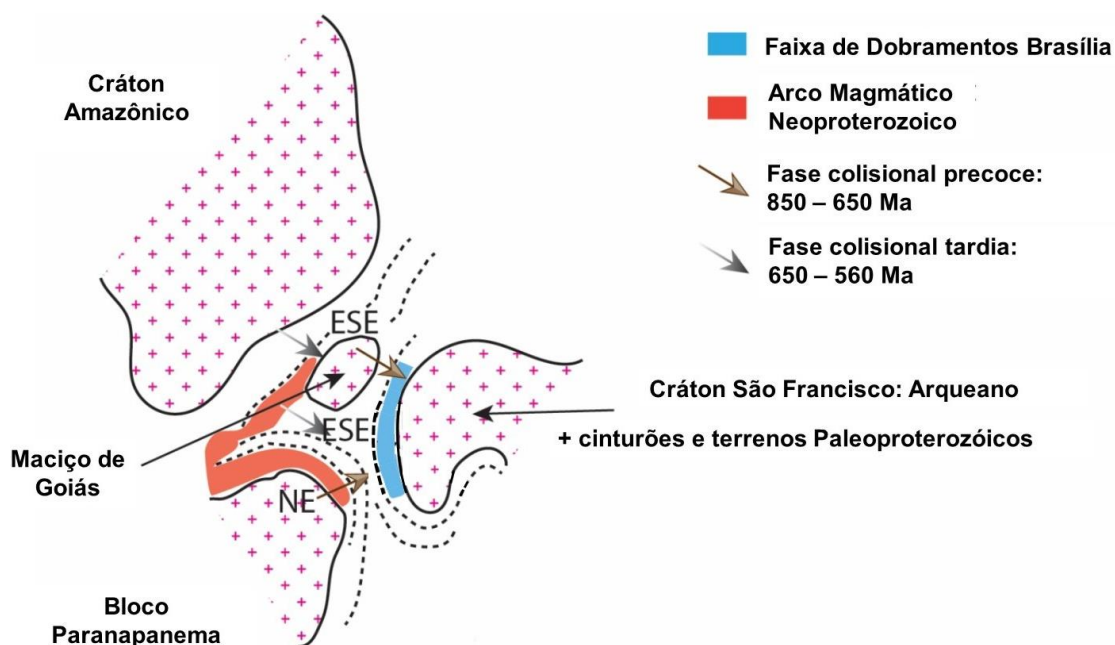


Figura 5: Colagem orogênica envolvendo os núcleos cratônicos Amazônico, São Franciscano e Paranapanema. Modificado de Fernandes (2019).

Os Complexos Máficos-Ultramáficos Cana Brava, Niquelândia e Barro Alto, são resultados da cristalização de câmaras magmáticas básicas (Girardi, 1986). Juntos, formam um dos maiores complexos ígneo estratificado do mundo, se estendendo por cerca de 350 km segundo alinhamento NNE-SSW, sendo caracterizado por inflexão para E-W na parte sul do Complexo Barro Alto. Esses complexos, estão encaixados em terrenos granito-gnáissicos intensamente deformados, sendo circundado por cobertura metassedimentar proterozóica de baixo grau (Winge, 1995).

De acordo com Fuck *et al.* (1981), o alinhamento, a proximidade, a compartimentação tectono-estrutural característica e as assinaturas geoquímicas semelhantes para fácies correlacionáveis, demonstram que os três complexos e as sequências vulcano-associadas são análogos e geneticamente ligados. A figura 6 mostra a distribuição dos Complexos Máficos-Ultramáficos Cana Brava, Niquelândia e Barro Alto na Província Tocantins.

Vários pesquisadores propuseram modelos evolutivos para os Complexos Máficos-Ultramáficos (e.g. Araújo & Alves, 1979; Ribeiro & Teixeira, 1981; Fuck *et al.*, 1981). De acordo com Hasui & Mioto (1988), a organização do complexo estaria correlacionada ao arqueano quando, decorrente de evento colisional, emergiram como um sistema de falhas inversas do tipo “*pop up*” em regime compressivo.

Filho *et al.* (1992), utilizando dados geocronológicos, propôs um modelo de evolução parecido com o de Girardi *et al.* (1986). Neste modelo, os complexos estariam correlacionados a um rifteamento continental e consequente intrusão estratiforme há cerca de 1580 Ma, que teriam sido afetados por dois principais eventos deformacionais: o primeiro evento ocorreu entre 760 - 770 Ma (U-Pb em zircão), durante o Neoproterozoico, e está associado a um metamorfismo de alto grau, variando entre as fácies anfíbolito e granulito (Filho *et al.*, 1994). O segundo evento está associado à orogênese final entre os crátons do São Francisco e Amazônico, que ocorreu por volta de 630 Ma e foi responsável pela geometria atual dos complexos (Pimentel *et al.*, 2000).

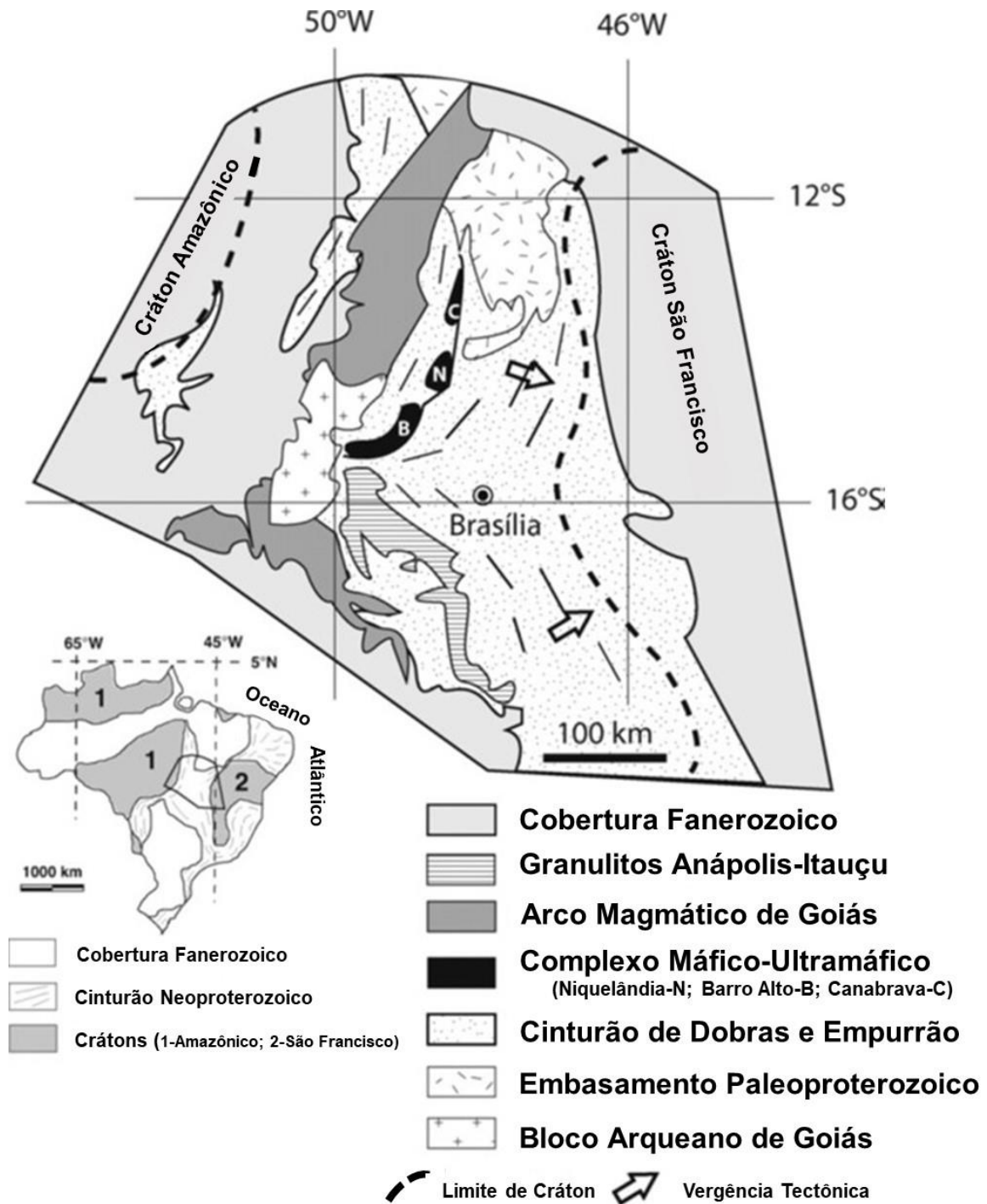


Figura 6: Mapa geológico da Província Tocantins, com destaque para os Complexos Máfico-Ultramáfico (modificado de Filho *et al.*, 2010).

2.3.2. Geologia local

A origem do Complexo Máfico-Ultramáfico Barro Alto está correlacionada a dois principais eventos magmático. O mais antigo, conforme Filho (1998), ocorreu

no Mesoproterozóico (1.25 Ga) e está relacionado ao complexo acamadado Serra da Malacacheta - Série Acamadada Superior. Posteriormente, no Neoproterozoico (0.79 Ga), ocorreu um novo evento ígneo associado a Zona Máfica Inferior e Zona Ultramáfica do complexo (Correia et al., 1999).

De acordo com Junior et al., (1982), o complexo abrange os municípios de Barro Alto, Goianésia, Ceres, Rialma e Rubiataba, totalizando uma área de 2.860 Km². Geometricamente, é caracterizado por dois segmentos que estão justapostos e/ou separados por estrutura de falhas, atribuindo um formato ao complexo semelhante a um arco com concavidade dirigida para NW. Juntos, os dois seguimentos totalizam 156 km de comprimento de eixo mediano e largura variando entre 8 – 25 km.

Junior et al., (1982) propuseram a divisão do complexo em duas sequências, oriental e ocidental.

O seguimento oriental do complexo se estende, a partir da cidade de Goianésia, por 80 km na direção NS até as margens do rio Maranhão. A zona central deste seguimento é caracterizada por rochas variando de peridotitos, parcialmente serpentinizados, até anortositos e, por esse motivo, é denominada de Sequência Oriental Diferenciada.

O seguimento ocidental se estende, a partir de Goianésia, por 76 km na direção E-W até as proximidades da cidade de Rubiataba e, por não ser observado um padrão de fracionamento, foi denominada de Sequência Ocidental Não Diferenciada. A figura 7 ilustra a distribuição do Complexo Barro Alto.

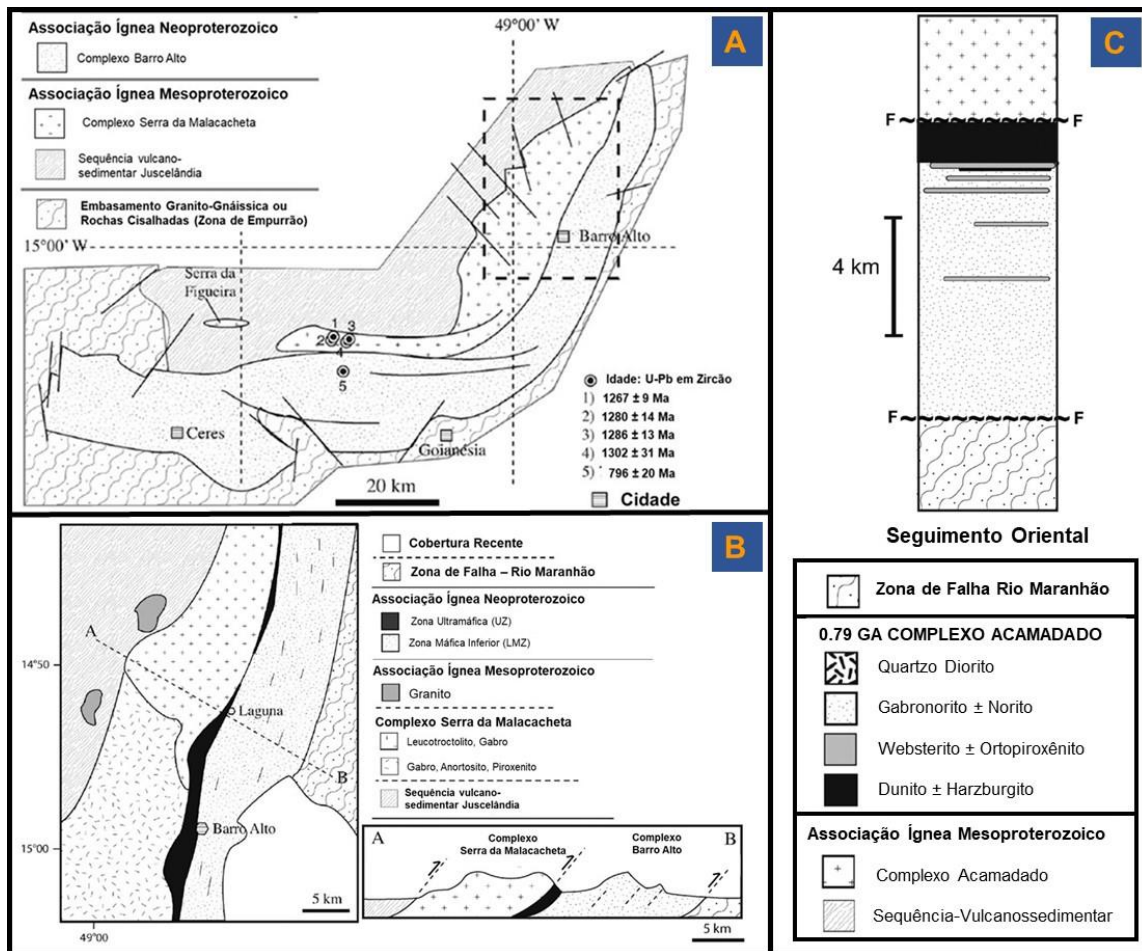


Figura 7: A- Mapa geológico esquemático da região de Ceres, Goianésia e Barro Alto; B – Seção geológica esquemática; C – Coluna estratigráfica do Complexo Barro Alto (Modificado de Filho *et al.*, 2010).

O depósito de níquel de Barro Alto é classificado como um depósito supergênico, caracterizado por uma faixa de rochas ultrabásicas, parcialmente serpentinizada, a qual a mineralização está associada (Junior *et al.*, 1982). De acordo com Junior (1986), o minério da Mina de Barro Alto pode ser separado em três tipos: oxidado, silicatado ou serpentinitico e transicional. O minério oxidado é caracterizado por 34% de Fe e o Ni está associado à goetita; o silicatado ou serpentinitico possui cerca de 22% de Fe e o Ni está associado à crisotila, lizardita e antigorita; o minério transicional detém entre 22 – 34% de Fe e o Ni está associado à nontronita. A figura 8 exemplifica a variação dos teores de níquel de acordo com o perfil de alteração.

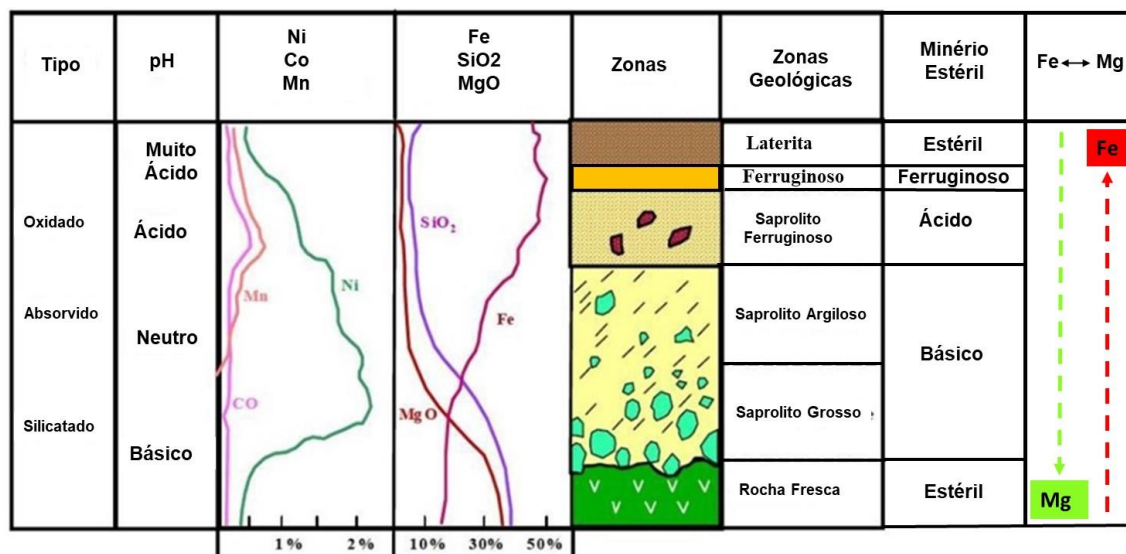


Figura 8: Variação dos teores de níquel de acordo com o perfil de alteração: saprólito grosso, coerente e homogêneo, resultado da substituição de olivina por esmectita; saprólito argiloso, caracterizado pela perda de coesão e substituição da serpentina por nontronita (Fe-esmectita); saprólito ferruginoso, no qual os Fe-silicatos foram substituídos por hidróxidos de ferro (nontronita passa para goethita); passagem para o horizonte laterítico marcada pela desestruturação dos saprólitos e ingresso de goethita (modificado Anglo American).

O perfil laterítico de Barro Alto foi organizado de acordo com a topografia, da seguinte forma: *Plain Type Ore* - PTO, *East Type Ore* - ETO e *West Type Ore* – WTO, conforme perfil esquemático da figura 9. O perfil PTO está localizado na parte plana, onde os processos de intemperismo agiram com maior intensidade. O perfil ETO é similar ao PTO, no entanto, apresenta um perfil laterítico menor e, por estar situado nas encostas topográficas, pode ocorrer material transportado. O perfil WTO está localizado nas porções mais altas e é caracterizado pela ocorrência de calcedônias (Anglo American).

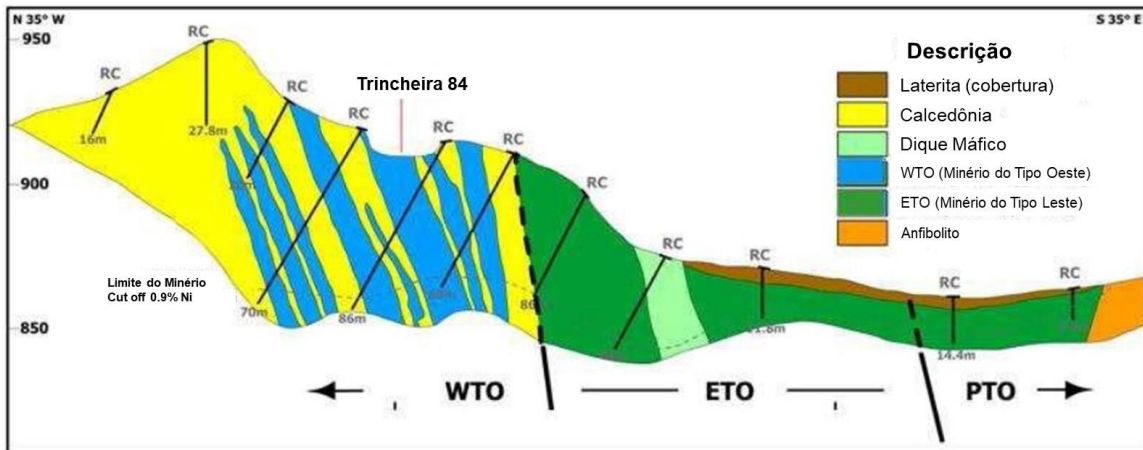


Figura 9: Perfil laterítico de Barro Alto organizado de acordo com a topografia. (modificado Anglo American).

3. Geologia da Área 1 – Pit 4 – Frente 1 (A1P4F1)

A área de estudo é predominantemente caracterizada por litologias associadas ao Complexo Máfico-Ultramáfico Barro Alto e, de acordo com o padrão utilizado na mina, foram mapeados Dunito-Serpentinizado, *Boulder* de Dunito, Minério Básico, Minério Ácido, Minério Ferruginoso, Estéril Interno, Calcedônia *soft*, Calcedônia *hard* e Solo laterítico. Tais litologias estão dispostas segundo o perfil de alteração padrão para esse tipo de depósito entremeadas as “Cabeças de *Boulder*” e as calcedônias – que formam uma capa de proteção contra os agentes intempéricos. A figura esquemática 10 apresenta a área mapeada com a subdivisão proposta para este estudo e, o mapa de pontos do anexo C, demonstra a distribuição dos pontos de controle do mapeamento geológico-geotécnico.

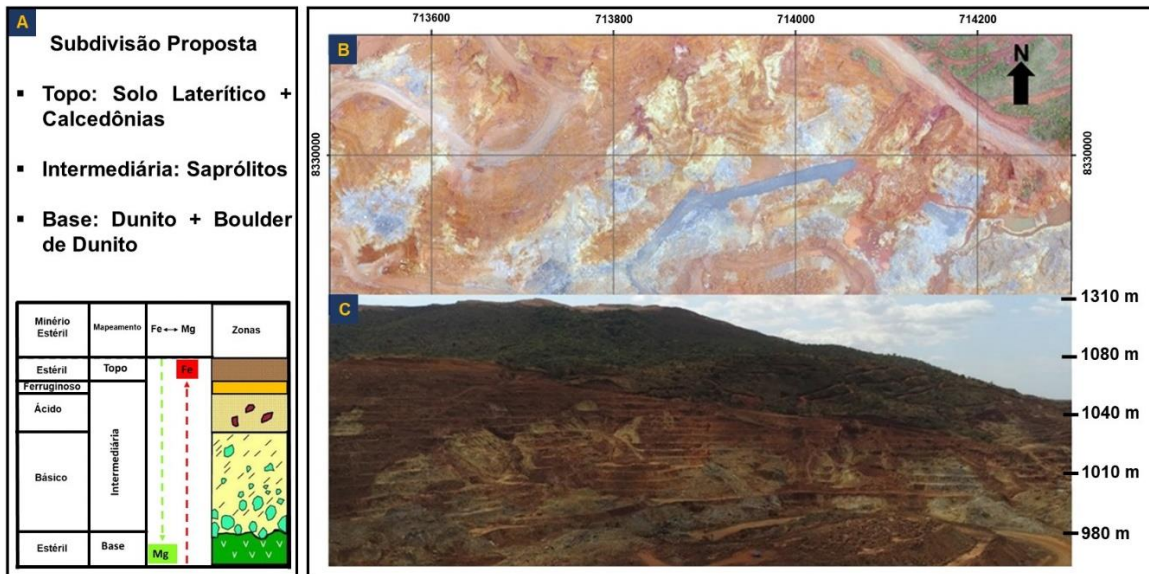


Figura 10: Vista da área de estudo, através de imagens aéreas obtidas por drone, e subdivisão proposta para o mapeamento. A – Perfil de intemperismo típico do depósito; B - Vista em planta da área de estudo; C - Vista em perfil segundo direção SW-NE.

3.1. Base do Perfil de Intemperismo

A base do perfil de intemperismo é caracterizada pelas unidades litológicas Dunito e *Boulder*, figura 11-A.

O dunito é uma rocha ultramáfica e ultrabásica composta, principalmente, por olivina $[(Mg, Fe)_2SiO_4]$ (~90%), e piroxênio, magnetita e mica. Essa unidade apresenta matriz compacta e homogênea, parcialmente alterada para serpentina, magnetismo variando entre médio-alto, bandamento ígneo bem-marcado, granulação variando entre fina a média e textura hipocristalina com grau de visibilidade subfanerítica.

O *boulder* é um material proveniente da alteração do dunito. Essa unidade marca a transição minério-rocha e apresenta geometria irregular, sendo caracterizado por formato arredondado concêntrico – aspecto típico de rocha heterogênea caracterizada por esfoliação esferoidal.

Essas duas unidades são geneticamente a mesma rocha, e podem ser diferenciadas pela mudança de coloração associada ao intemperismo. Em geral, compõe o fundo de cava da mina e determinam o limite do avanço da lavra, uma vez que o material que apresenta interesse econômico é proveniente da ação do

intemperismo. Associado as fraturas, no dunito e *boulder*, é comum encontrar veios de quartzo-feldspato e silicatos hidratados de níquel (garnierita), figuras 11-B e 11-C.

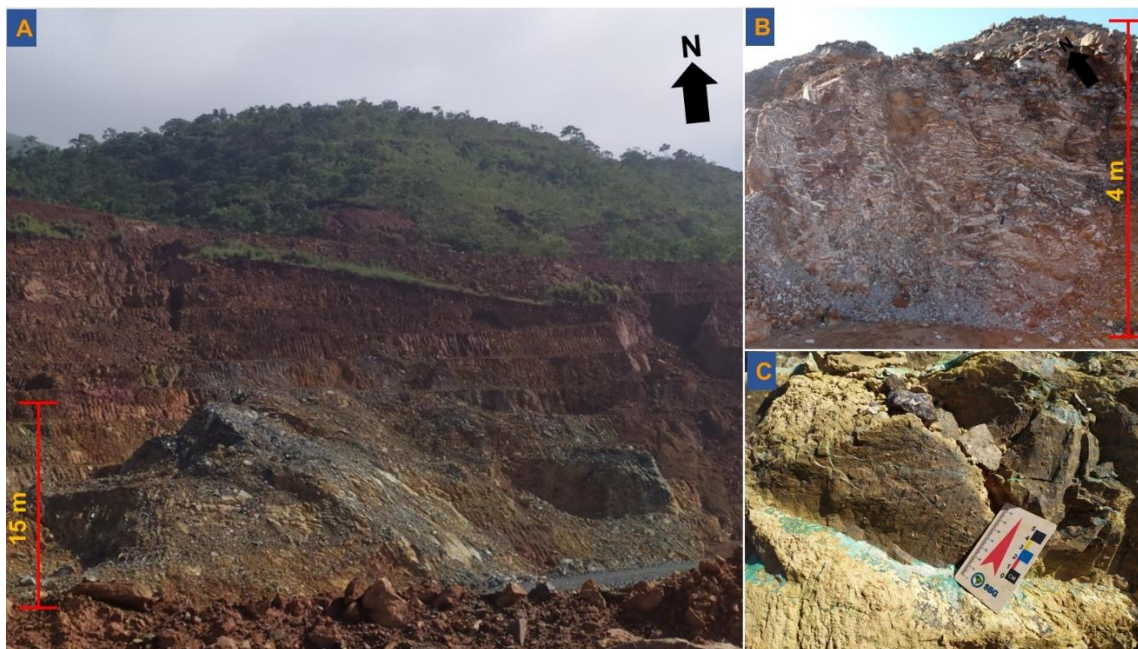


Figura 11: A - *Boulder* de dunito de \pm 15m de altura e geometria irregular; B - *Boulder* de dunito caracterizado por intenso fraturamento preenchido com pegmatito (Ponto 48); C - *Boulder* com fraturas preenchidas por garnierita (Ponto 123).

3.2. Porção Intermediária do Perfil de Intemperismo

A porção intermediária do perfil de intemperismo é composta por vários tipos de materiais, incluindo as diferentes unidades de minério e estéril. Entre eles estão: Minério Básico, Minério Ácido, Minério Ferruginoso e Estéril Interno.

O minério básico, conforme figura 12, é um material bastante heterogêneo, apresenta coloração variando entre verde-acinzentado a verde-amarelado e pode ser encontrado em diferentes estados de alteração (friável ou resistente), incluindo como blocos de rocha menos alterada caracterizada por preenchimento de material argiloso dos espaços intrablocos. Esse tipo de material normalmente ocorre entre o *boulder* e o minério ácido, caracterizando-se como um produto de alteração direta do *boulder*.



Figura 12: Minério básico, apresentando coloração verde-amarelada (Ponto 138).

O minério ácido é tipicamente encontrado em contato com as calcedônias, podendo ocorrer acondicionado em superfícies dobradas, conforme figuras 13-A e B. Em menor proporção, esse tipo de minério também ocorre entre o minério básico e a zona ferruginosa.

A passagem deste para o horizonte superior e/ou inferior é transicional, sendo comum a ocorrência de blocos métricos de dunito, venulados e intensamente silicificados, intercalados ou imerso ao corpo de minério, figura 13-C.

Essa unidade apresenta coloração variando entre verde-amarelado e verde-avermelhado, textura untuosa marcante, estado avançado de alteração e/ou fragmentação e, em alguns pontos, ocorre associado à intensa venulação de pegmatitos. A figura esquemática 13-D, traz um exemplo do minério ácido verde-amarelado, caracterizado por textura untuosa e muito quebradiço.



Figura 13: Diferentes aspectos do minério ácido. Minério ácido encaixado em calcedônia (A – Ponto 155 e B – Ponto 100); C – Bloco de calcedônia imerso ao minério ácido (Ponto 102); D – Minério ácido de coloração verde-avermelhado (Ponto 151).

O minério ferruginoso, conforme figura 14, é caracterizado por coloração marrom-avermelhado e/ou laranja escuro e elevado grau de intemperismo, apresentando, em alguns casos, características compatíveis com os de solos maduros. Esse tipo de material é tipicamente encontrado em contato com as calcedônias e/ou solo laterítico, sendo representado por corpos de pequena a média extensão.

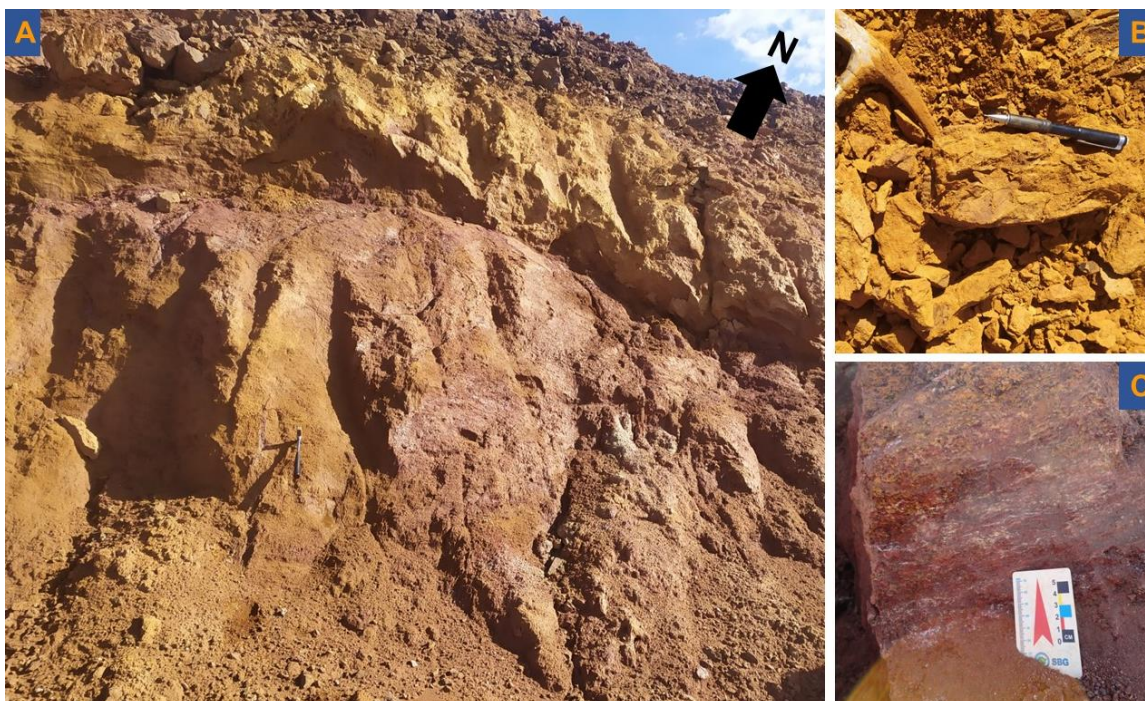


Figura 14: A – Corpo de minério ferruginoso sob calcedônias (Ponto 30); B – Coloração típica do minério ferruginoso (Ponto 113); C – Minério ferruginoso apresentando fino bandamento (Ponto 163).

Com relação ao estéril interno, essa unidade ocorre associada aos diferentes tipos de minério e, para operação de lavra, todo material que não se enquadra quimicamente como algum tipo de minério é classificado como estéril interno, podendo apresentar variações na textura, dureza e coloração. Dentro desta variabilidade, alguns corpos de pequenas dimensões, coloração avermelhada, grau de intemperismo elevado e bastante argiloso foram classificados como estéril interno.

3.3. Topo do Perfil de Intemperismo

O topo do perfil de intemperismo é predominantemente caracterizado por calcedônias e solo laterítico.

Na área de estudos, a calcedônia ocorre predominantemente recobrando o perfil de intemperismo, sendo, em menor proporção, também observado em contato com o dunito. O contato entre essas duas unidades ocorre precedido de um fino horizonte intemperizado ou camada de material argiloso, sendo possível observar variação no nível de silicificação do dunito.

De acordo com Trecases *et al.* (1981), as rochas associadas ao processo de silicificação são essencialmente compostas por sílica (quartzo, calcedônia e sílica amorfa) e por óxido-hidróxido de ferro. E, ainda acrescentam que, a distribuição espacial desses componentes é compatível com a estrutura da rocha original. Dentro deste contexto, durante o mapeamento foi observado que alguns blocos de calcedônia são caracterizados por um padrão de vênulas idênticos aos que ocorrem nos dunitos.

Na mina de Barro Alto a calcedônia é classificada em dois tipos, *hard* e *soft*. A calcedônia *hard* (figura 15-A) apresenta coloração variando entre marrom escura à marrom-avermelhada, matriz compacta, abrasividade alta e muito resistente. Enquanto a calcedônia *soft* (figura 15-C) apresenta predominantemente coloração marrom-amarelada, sendo composta por blocos, variando entre matacões e pedregulhos, caracterizados por alta porosidade que se encontram imersos em uma matriz de granulometria areia fina e/ou silte. Nas figuras 15-B e 15-D é possível observar algumas características das calcedônias em melhor detalhe.

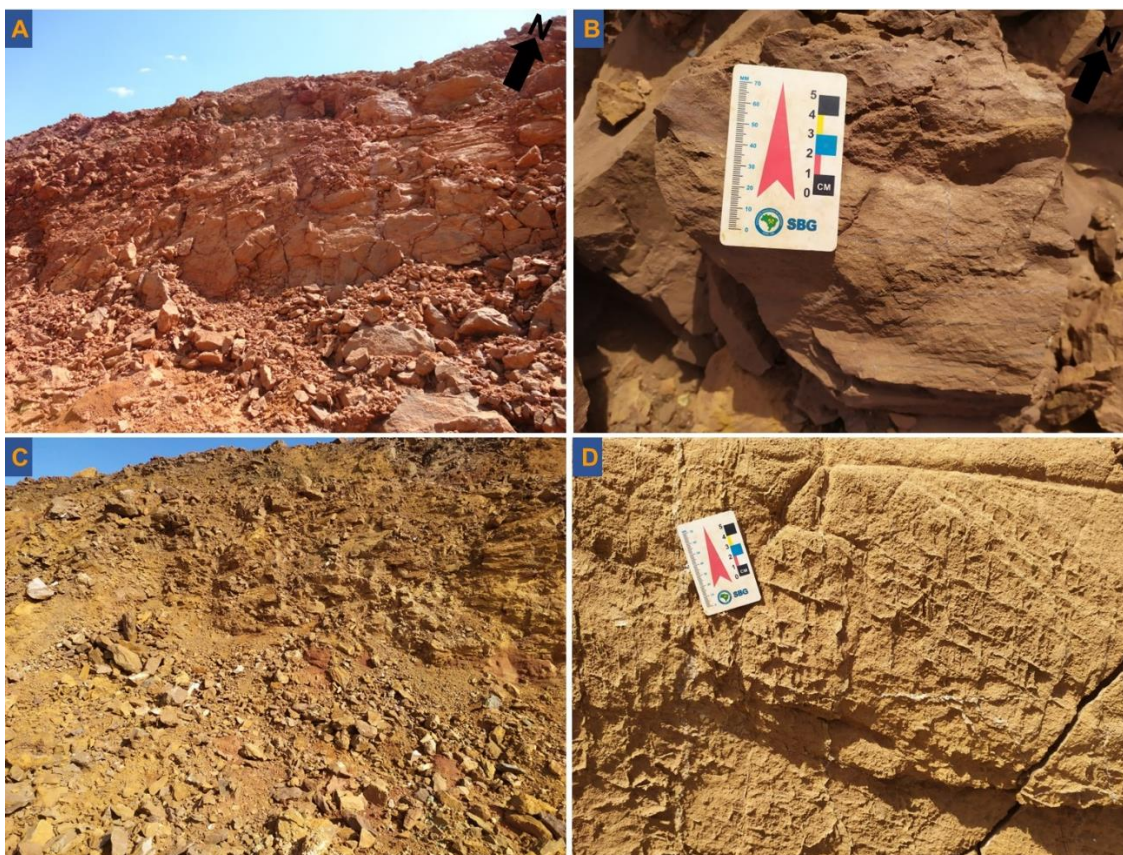


Figura 15: A – Talude composto por calcedônia *hard*, marrom-avermelhada e com alta resistência (Ponto 31); B – Foto em detalhe da calcedônia *hard*; C – Talude

composto por calcedônia *soft* marrom-amarelada, caracterizada por blocos porosos imersos em uma matriz de granulometria variando entre areia fina e silte (Ponto 164); D – Foto de detalhe da calcedônia *soft*, com porosidade incipiente e venulação bem marcada.

As restritas exposições de solo laterítico (figura 16) que ocorre na área de estudos são encontradas no topo do perfil, sendo caracterizado por coloração vermelho escuro, forte magnetismo e representa o mais alto grau de intemperismo do dunito.

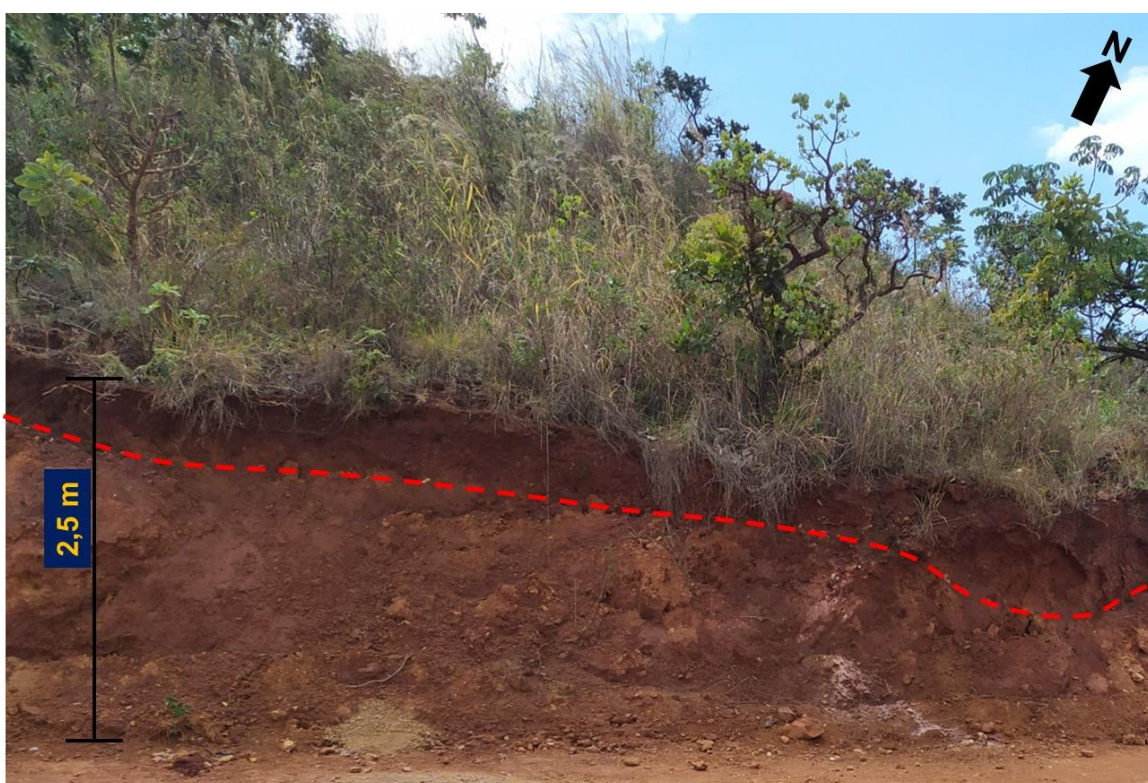


Figura 16: Fina cobertura de solo laterítico (Ponto 120).

3.4. Geologia Estrutural da Área A1P4F1

A análise estrutural da área iniciou com a descrição dos principais lineamentos regionais, que indicou existência de duas direções preferenciais de lineamentos, uma com tendência NE-SW e outra orientada segundo NW-SE. Os lineamentos orientados para NE-SW infletem para leste, ao norte da área 1 e, após tomar novamente sua direção preferencial, observa-se uma leve inflexão para norte na extremidade noroeste da área da mina, conforme pode ser

observado na figura 17-A. As duas direções preferenciais dos lineamentos também podem ser observadas por meio de dados magnetométricos interpretados pela Anglo American, além de sugerir uma nova direção de lineamento de caráter local/pontual arranjado segundo direção N-S. A figura 17-B demonstra os lineamentos interpretados a partir de dados geofísicos.

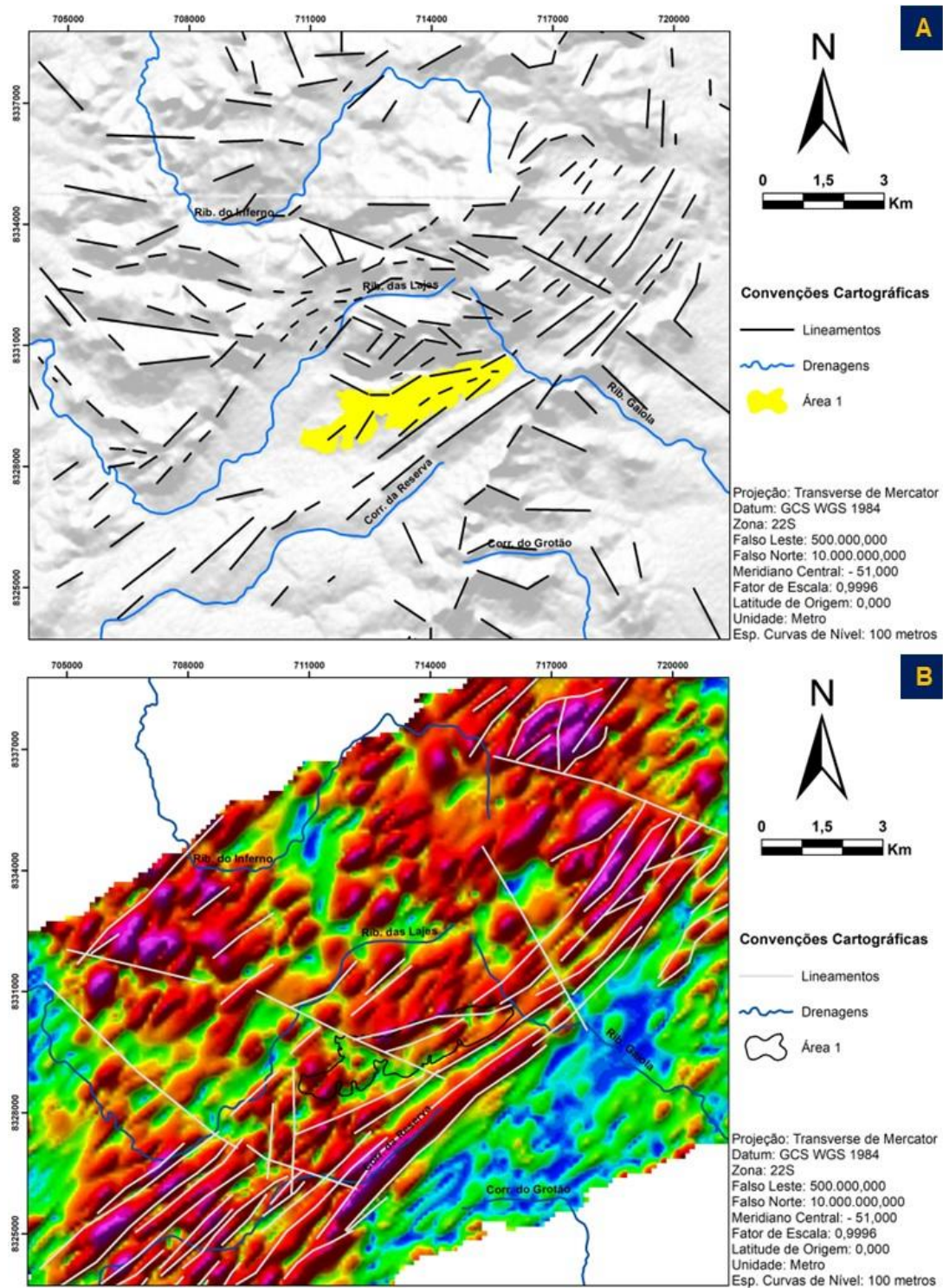


Figura 17: A – Fotointerpretação através de imagem de radar; B – Interpretação de lineamentos através de dados magnetométricos (Anglo American).

Um estudo preliminar das estruturas mapeadas mostrou não ser possível propor uma divisão da cava da mina com base em domínios estruturais. Assim, para dar suporte aos trabalhos geotécnicos e entender a influência de tais

estruturas no maciço como um todo, o tratamento e análise dos dados foi realizado com base no perfil de intemperismo e/ou unidades mapeadas

Os dados estruturais foram agrupados em níveis de base, intermediário e topo. O nível de base é composto por dunito e *boulder*, o intermediário pelos diferentes tipos de saprólitos e o topo por calcedônias.

No fundo de cava caracteriza-se pelas melhores exposições de afloramentos de rocha e estruturas preservadas. Neste nível são observados padrões de interferência de dobramento padrão do tipo 2 de Ramsay (1967), conhecido como tipo *bumerangue*. Neste tipo de padrão, conforme McClay (1987), é definido por fases de dobramentos com superfícies/planos axiais com inclinações de mergulhos diferentes e eixos horizontais, porém ambos ortogonais entre si.

As foliações na área de estudo foram classificadas conforme a nomenclatura e morfologia de McClay (1987) e Passchier & Trouw (2005). Foi observada e caracterizada uma xistosidade (S_1) subparalela ao bandamento composicional (S_0). Também são observadas clivagens disjuntivas espaçadas (S_2), vênulas e veios de quartzo, planos de falhas e juntas. A figura 18 apresenta algumas das estruturas observadas.

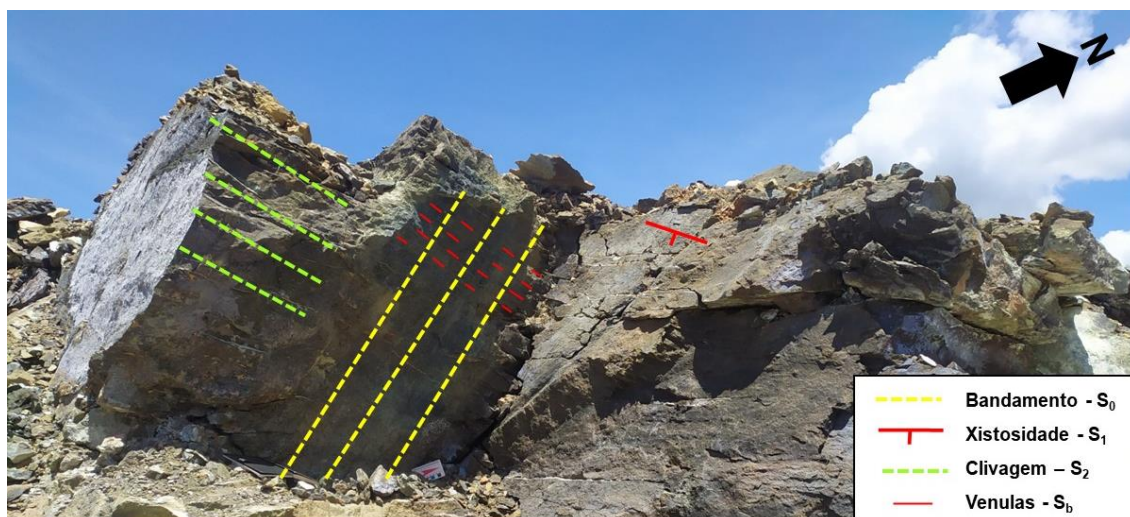


Figura 18: Afloramento representativo do nível de base, mostrando as relações hierárquicas das estruturas mapeadas na área de estudo.

Os autovetores (Woodcock, 1977) da distribuição da xistosidade (S_1), juntamente com as curvas de isofrequência de contagem são apresentados na figura 19, que apresenta os estereogramas da área de estudo. A orientação

preferencial da xistosidade (S_1) apresenta atitude preferencial com orientação (N64E/38SE) indicada pelo parâmetro estatístico de autovetor 1, que indica a maior concentração de dados (Campanha & Quintanilha, 1996). Os autovetores 2 e 3, são respectivamente relacionados a concentração intermediária e menor de dados, conforme descrito por Woodcock (1977) e Campanha & Quintanilha (1996). Os referidos autores também correlacionam o autovetor 3, ao eixo de dobra e o plano que contém os autovetores 1 e 2, ao plano axial.

Os estereogramas obtidos apresentam índices estatístico (Woodcock, 1977) de parâmetros de forma (K) entre 2,14 - 3,16 e dispersão (C) entre 1,97 - 5,95. Estes índices indicam no diagrama de Woodcock que as populações de dados estruturais são distribuídas próximas ao limite de transição de população em guirlandas ou unimodais.

A distribuição das curvas de isofrequências indicam padrões de distribuição ao longo de guirlandas indicativas da deformação por dobramento da xistosidade (S_1). Estas guirlandas apresentam orientação NW-SE, com o autovetor 3 (eixo calculado) predominantemente no quadrante SW. O autovetor 2 (polo associado ao plano axial) apresenta-se preferencialmente localizado no quadrante SE, indicando uma orientação do plano axial (N31E/63NW).

As orientações do plano axial e do eixo do dobramento indicada pelos autovetores (Woodcock, 1977) sugerem que as dobras observadas na área podem ser caracterizadas segundo a classificação de Fleuty (1964) em dobras do tipo inclinada com caimento, caracterizada por planos axiais e eixos inclinados.

Os padrões observados nas curvas indicam dobras cilíndricas com ângulos interflancos maiores que 70° indicando dobras suaves (Lisle & Leyshon, 2004). Os padrões de curvas de isofrequência também indicam um padrão de dobramento de dobras assimétricas (Rowland *et al.* 2006).

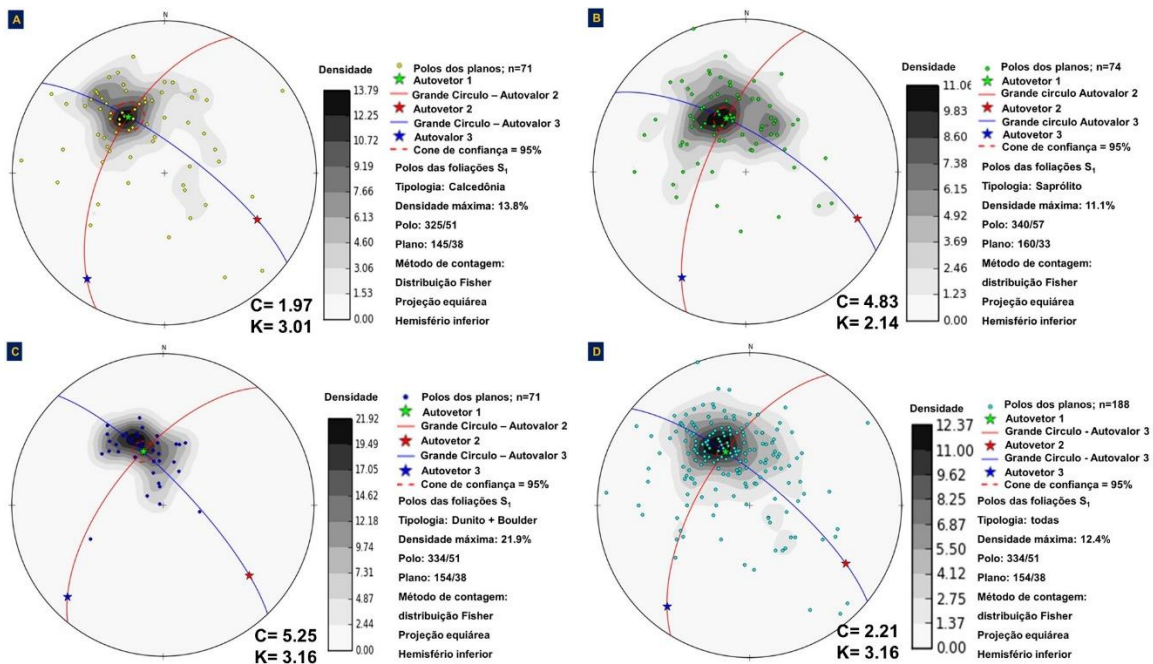


Figura 19: Estereogramas em semi-esfera inferior com isofrequência de contagem e autovetores (1,2 e 3) de Woodcock (1977) da xistosidade (S_1) para os setores da cava: A – Topo (Calcedônias); B – Intermediário (saprólito); C – Base (Dunito e Boulder de Dunito) e D – Total.

Uma análise dos dados ao longo do perfil de intemperismo mostrou que todos os setores da cava apresentam parâmetros estatísticos similares para a foliação S_1 .

As dobras caracterizadas no estereogramas possivelmente são relacionadas a uma segunda fase de dobramento (D_2), pois caracterizam a deformação do acamamento (S_0) e a xistosidade (S_1).

Em trabalhos anteriores, foi relatado que a foliação S_1 diverge da mapeada em escala regional, e que esse fato estaria relacionado ao segundo evento deformacional que atingiu o Complexo Barro Alto e impôs uma foliação S_1 diferente da mapeada no entorno (Anglo American).

Na área de estudos também são observadas clivagens disjuntivas (S_2), a figura 20 apresenta a distribuição no estereograma destas clivagens. Elas apresentam comportamento bem disperso. No entanto, há uma concentração de polos no quadrante SE, associado com uma orientação (N73E/38NW). Note que, os polos dessas medidas se concentram do lado oposto dos da foliação (S_1).

A clivagem disjuntiva (S_2) possivelmente é associada a uma terceira fase de dobramento (D_3), porém ressalta-se que esta interpretação, precisa ser maior detalhada.

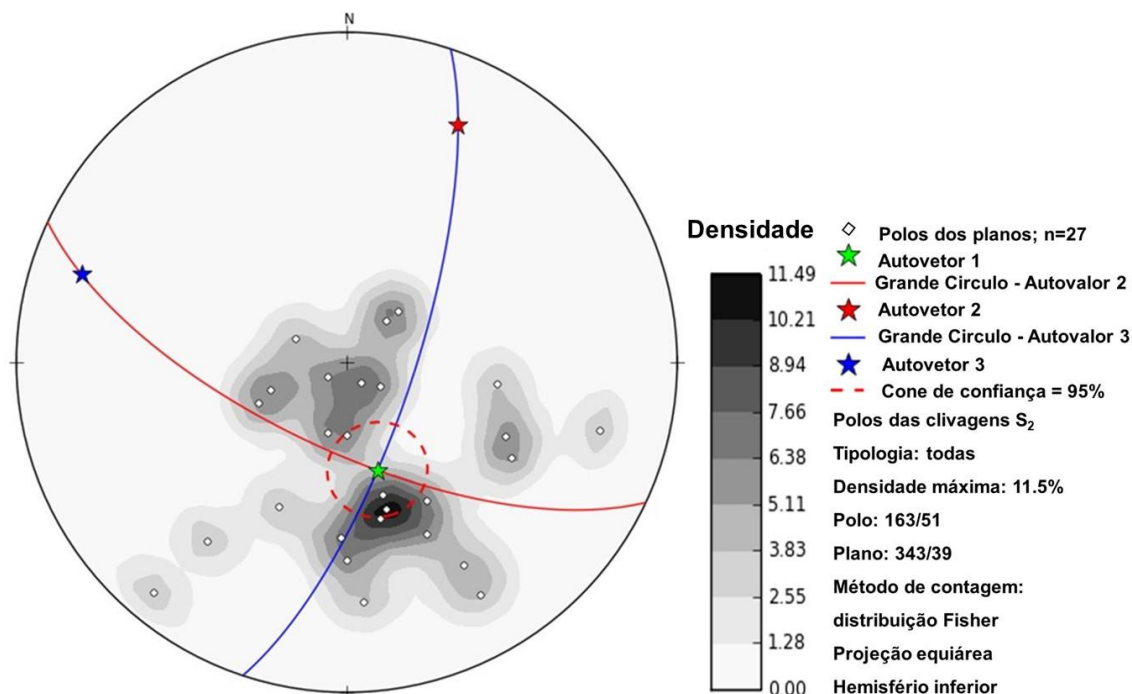


Figura 20: Estereogramas em semi-esfera inferior com isofrequência de contagem e autovetores (1,2 e 3) de Woodcock (1977) da clivagem (S_2).

Para análise das fraturas mapeadas (juntas e falhas), além dos diferentes níveis do perfil de alteração observado na cava, foram consideradas aquelas estruturas que apresentaram ângulo de inclinação maior que 60° . A partir deste tratamento, observou-se que o comportamento padrão para estas estruturas são semelhantes para toda a cava, exceto aquelas que apresentaram algum desvio da média que, assim como para os dados de foliação, pode estar correlacionado ao nível de alteração e/ou ao uso de explosivos para retirada da cobertura composta por calcedônias. Os estereogramas montados com base no perfil de intemperismo são apresentados na figura 21 – A, B, C e D.

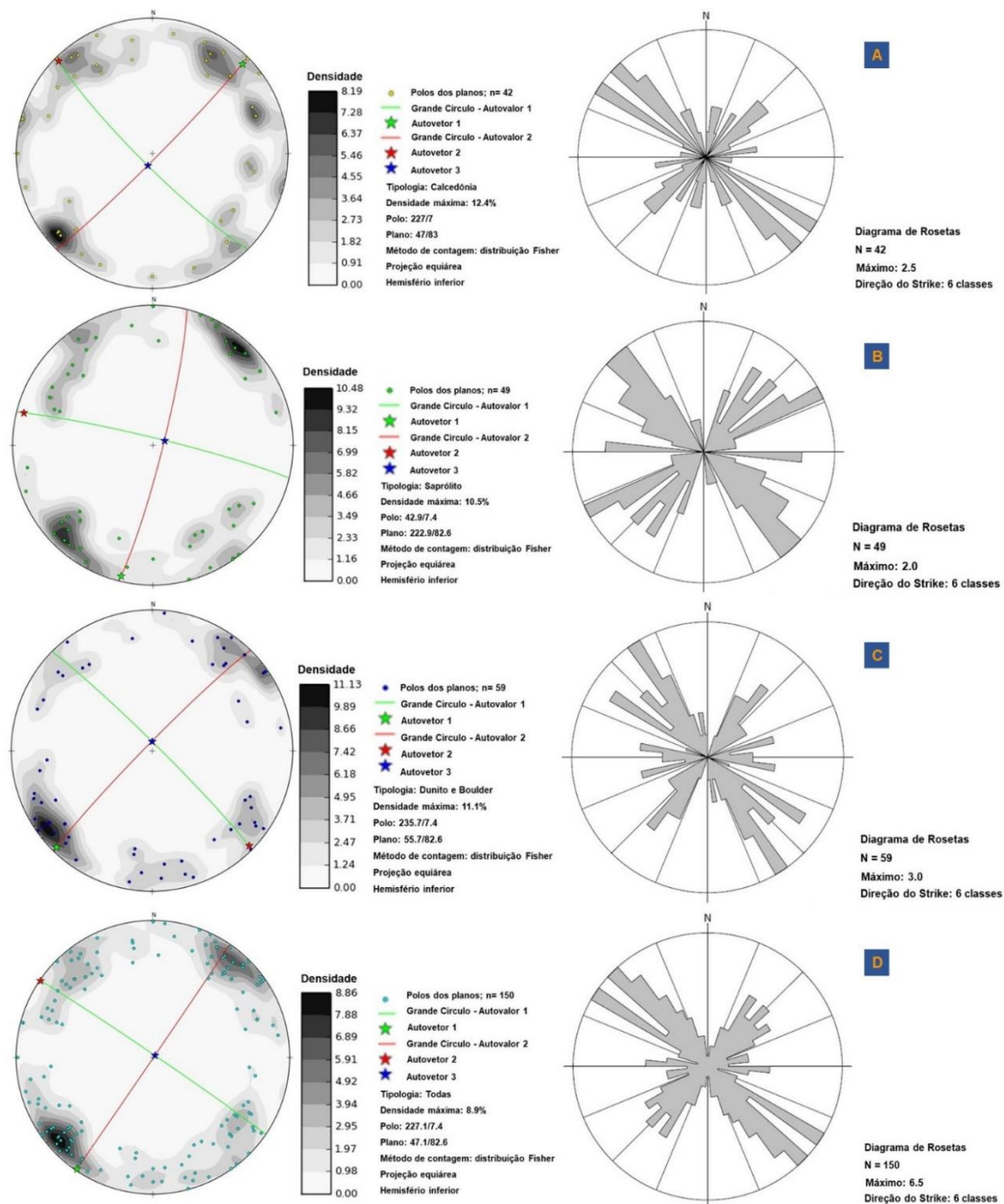


Figura 21: Estereogramas em semi-esfera inferior com isofrequência de contagem e autovetores (1,2 e 3) de Woodcock, (1977), em comparação aos diagramas de rosetas (A, B, C e D).

Desconsiderando algumas dispersões nos dados dos estereogramas, na área de estudos foram definidas duas direções preferenciais de estruturas, que estão alinhadas segundo direção NW/SE e NE/SW.

Em escala de afloramento, foram observados que as estruturas com direção NW/SE e NE/SW normalmente estão preenchidas por rochas fragmentadas, argilominerais e fragmentos de minerais (anfíbios, quartzo etc). A

figura 22, apresenta alguns exemplos de estruturas mapeadas em diferentes pontos e estágios de intemperismo.

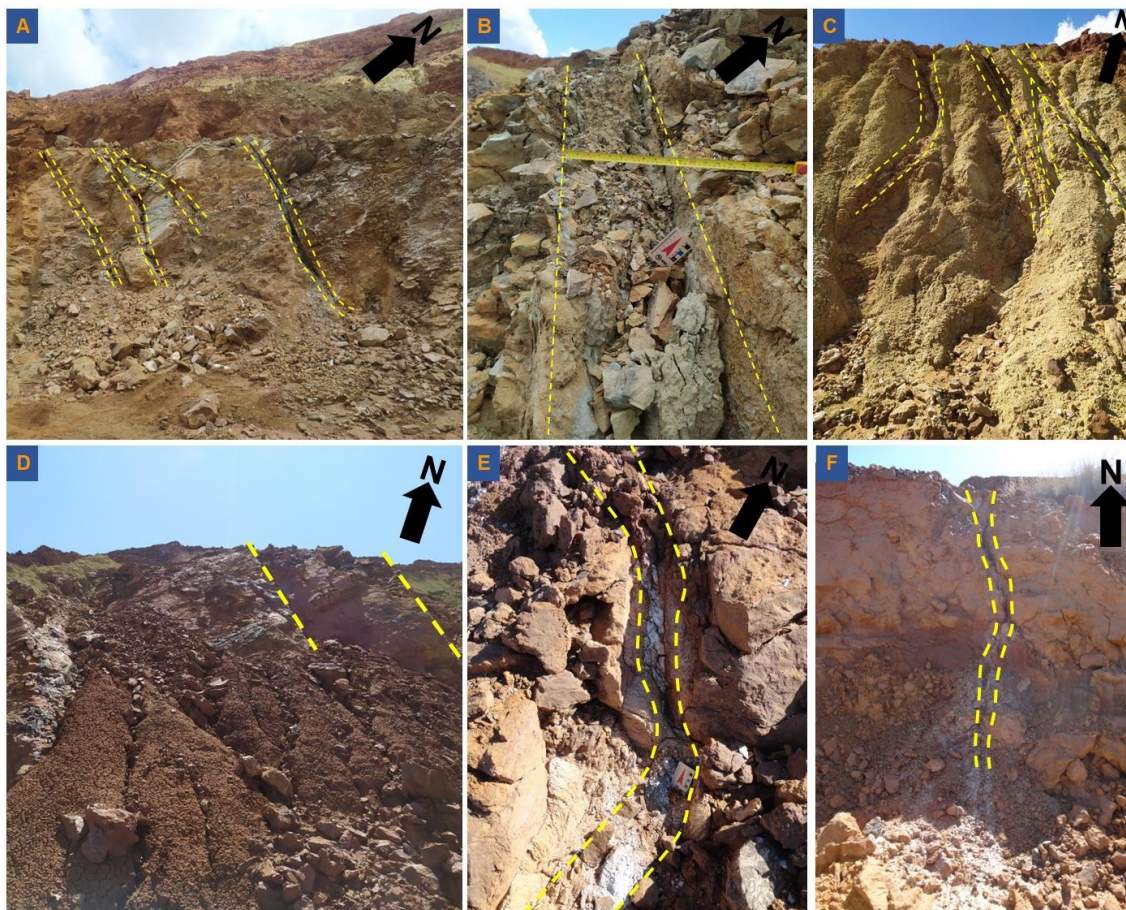


Figura 22: Estruturas mapeadas em diferentes pontos e estágios de intemperismo. A – Minério Básico (Ponto 48); B – *Boulder* (Ponto 37); C – Minério Ácido (Ponto 17); D – Afloramento de calcedônia caracterizada por fraturas NW-SE (Ponto 72); E – Calcedônia hard caracterizada por fraturamento preenchido (Ponto 146); F – Calcedônia Soft caracterizada por fratura preenchida por argilominerais e direção N-S (Ponto 216).

Também são observadas em menor frequência estruturas orientadas no sentido N-S. Estas estruturas também são observadas como lineamentos estruturais nas imagens de sensores remotos.

Na cava foram observados e mapeados planos de falhas, onde foram caracterizados a cinemática e orientação dos esforços. Juntamente com outras

estruturas de caráter rúptil, foi adotado um modelo estrutural baseado no modelo de dobramento cilíndrico associado a mecanismo por dobramento flexural.

De acordo com Fossen (2017), no desenvolvimento de dobras por dobramento flexural, o dobramento é caracterizado por deslizamentos ao longo das interfaces das camadas (deslizamento flexural). Nestes planos de deslizamento, Fossen (2017) indica que há desenvolvimento de estrias nas superfícies de deslizamento. Deste modo, alguns dos planos de falhas e estrias observadas na área de estudo são compatíveis com deslizamentos associados ao mecanismo de dobramento flexural.

A relação de ortogonalidade entre o sistema de fraturas NE-SW e NW-SE, e a relação destes com os planos axiais (plano ab) e planos de perfis de dobras (plano ac) são compatíveis com modelos idealizados de fraturamento associado a dobramento cilíndrico (McClay, 1987; Van Der Pluijin & Marshack, 2004) e dobramento por flexura (Davis e Reynolds, 1996). Nestes modelos ocorrem juntas extensionais paralelas ao plano axial e ao plano de perfil de dobras. A figura 23 apresenta o modelo idealizado de fraturas e juntas de McClay (1987). Deste modo, as fraturas NW-SE e NE-SW, são correlacionáveis respectivamente as fraturas extensionais longitudinais (fraturas ac) e ortogonais (fraturas ab).

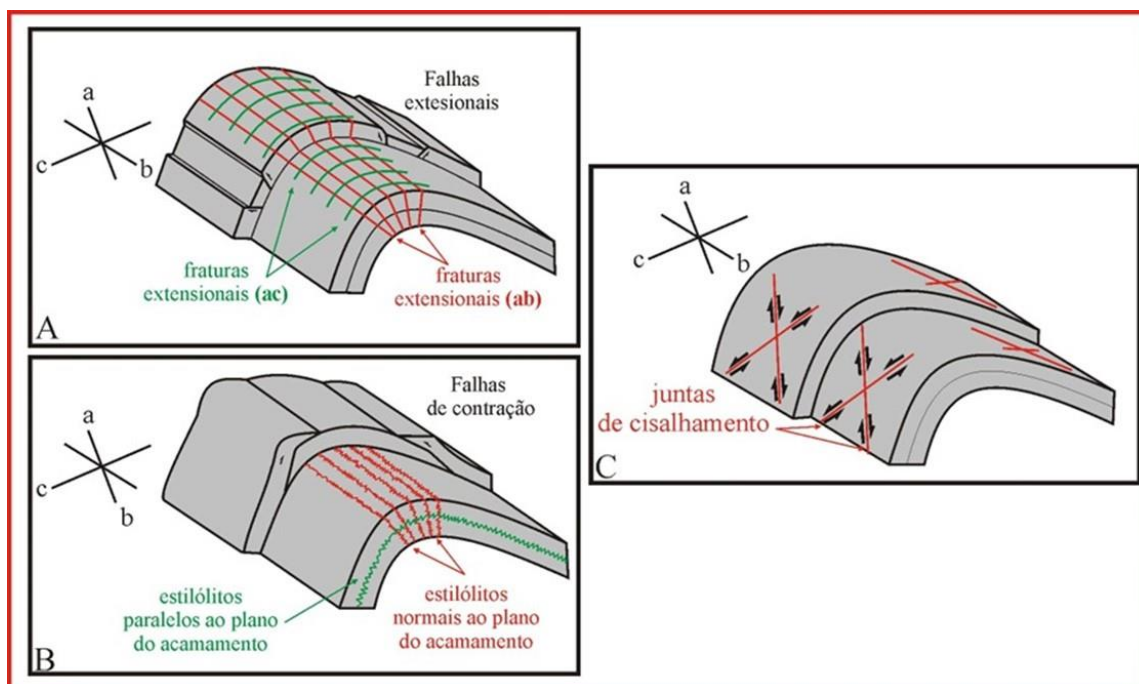


Figura 23: Padrões de fraturas, juntas e estruturas menores associadas ao desenvolvimento de sistema de dobramento cilíndrico (modificado de McClay, 1987).

Na área de estudos alguns dos planos de falhas é caracterizado por duas direções de estrias associadas a slickensides (Figura 24 A). Isto ressalta possíveis mudanças na orientação dos esforços compressivos durante os eventos deformacionais rúpteis.

A primeira direção de estrias observada (NW-SE), apresenta alta obliquidade e é associada a transporte de topo para NW. De modo geral, estas estrias indicam um caráter reverso na cinemática.

A segunda direção de estrias (NE/SW) apresenta ângulo de obliquidade média e é associado com transporte de topo para SW. O ângulo de obliquidade observado indica que estas estrias apresentam um componente na cinemática reverso e sinistral. Associada a esta direção de estrias ocorrem veios sigmoidais (tension gashes, figura 24 B) que também apresentam transporte de topo para SW.

Conforme já exposto, os planos de falhas observados são correlacionáveis a planos de deslizamentos associados ao desenvolvimento de dobramento por flexura.

É importante ressaltar que o padrão das feições estruturais observados em campo podem estar associados a outros modelos estruturais, como por exemplo dobras associadas a sistemas de juntas conjugados de alto mergulho (figura 24 C e D). No entanto, para esse trabalho, foi optado pelo modelo mais simples e com melhor representatividade de dados. Além disso, para testar outros modelos, seriam necessários mais tempo e discussão.

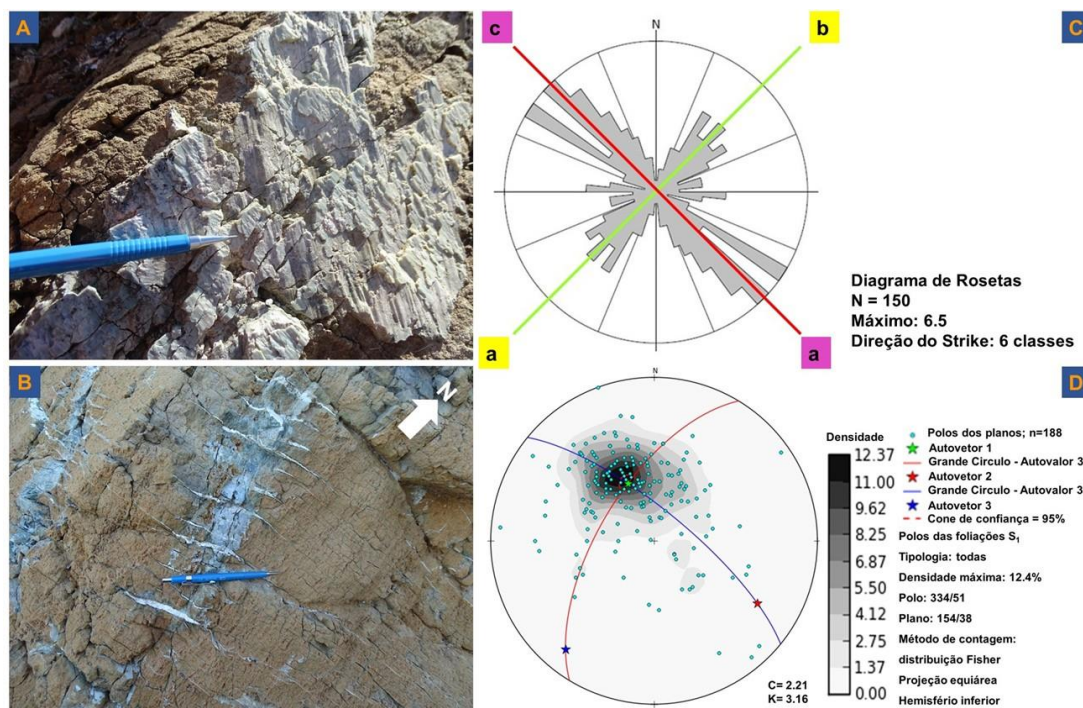


Figura 24: Estruturas rúpteis e cinemática interpretada da área de estudo. A) Plano de falha com desenvolvimento de *slinksides*. Na figura são observadas dois conjuntos de *slinksides*. Um com alta obliquidade ($\sim 90^\circ$) e outro com obliquidade média ($\sim 45^\circ$). B) Veios sigmoidais (*tension gashes*) indicando cinemática com transporte de topo para SW. C) Diagrama de rosetas da direção das fraturas da área de estudo. Indicando as direções principais de fraturamento NE-SW (em verde) e NW-SE (vermelho). D) Estereogramas em semi-esfera inferior com isofrequência de contagem e autovetores (1,2 e 3) de Woodcock, 1977 da xistosidade (S₁).

Também foram observadas superfícies de deslizamentos, presentes em toda a área. São caracterizadas como superfícies espelhadas e estriadas, compostas por material argiloso, marrom-avermelhado e normalmente estão localizadas no contato entre litologias. Esses planos de deslizamentos possuem dimensões variadas e estão orientados subparalelos ao plano de foliação, com direção estimada em N84W/40SW. A figura 25, ilustra alguns planos de deslizamento da área.

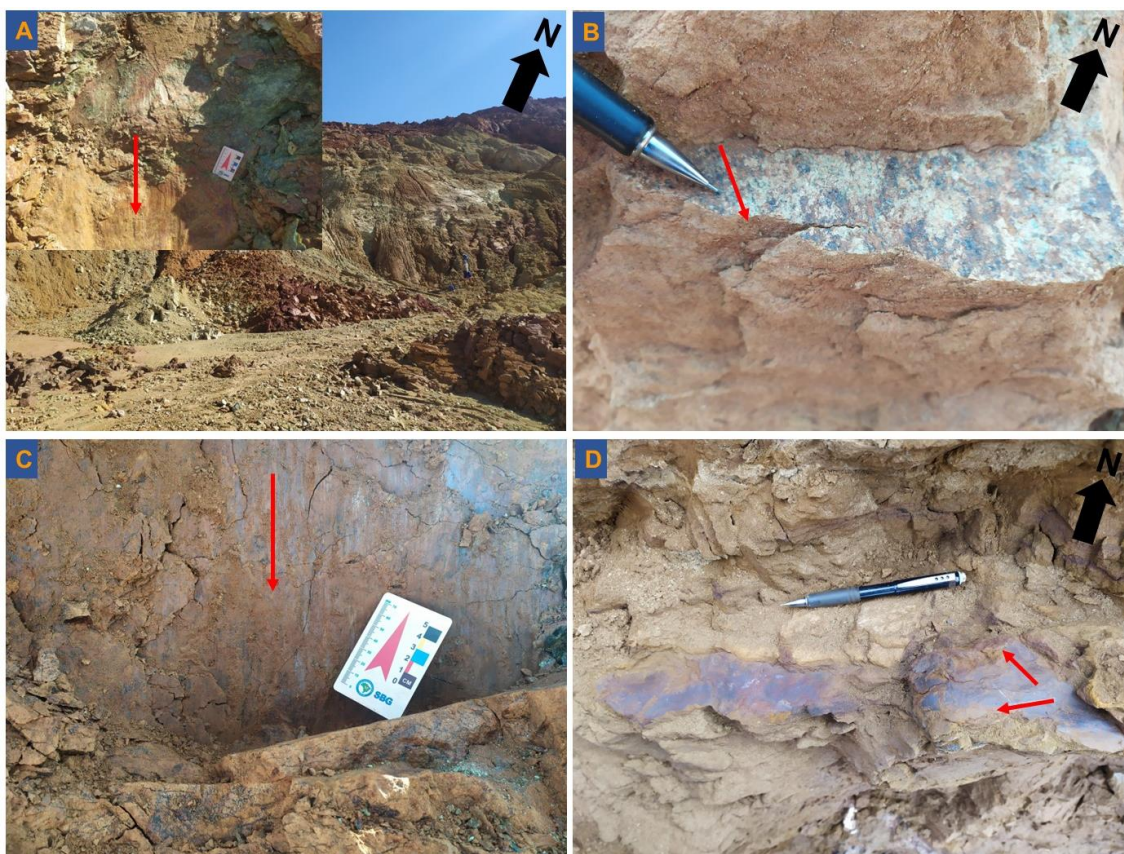


Figura 25: Superfícies espelhadas e estriadas em rocha altera. A – ponto 133; B- ponto 67, C – ponto 127; D – ponto 119.

Alguns destes planos de deslizamentos são provavelmente associados ao ciclo de saturação-desidratação do maciço que, conseqüentemente, parecem ter sido provocadas pela acomodação das camadas para os diferentes estados de saturação.

3.5. Compartimentação do Maciço e Estabilidade de Taludes

Uma das etapas iniciais em um estudo de estabilidade de taludes é o mapeamento geológico. Através desta ferramenta é possível classificar as diferentes unidades na área e levantar todos os planos de descontinuidades presentes, tais como: fraturas, diaclases e falhas. A partir dos diversos elementos observados e caracterizados, o mapeamento geológico oferece subsídio para montar o modelo litoestrutural que rege o comportamento do maciço (Charbel, 2008).

Em mina a céu aberto, a compartimentação do maciço permite separar a cava da mina em setores que apresentam as mesmas características litoestruturais, oferecendo um valioso recurso para escavação da mina e/ou os estudos de estabilidade de taludes (Charbel, 2008).

O dimensionamento da cava da mina e de suas bancadas devem ser tecnicamente planejadas de forma a garantir índices de segurança aceitáveis e/ou evitar movimentações de massa durante e, após atividade mineira, quando se tem a cava final da mina (Charbel, 2008).

Os elementos geométricos do talude de mina a céu aberto estão representados na figura 26.

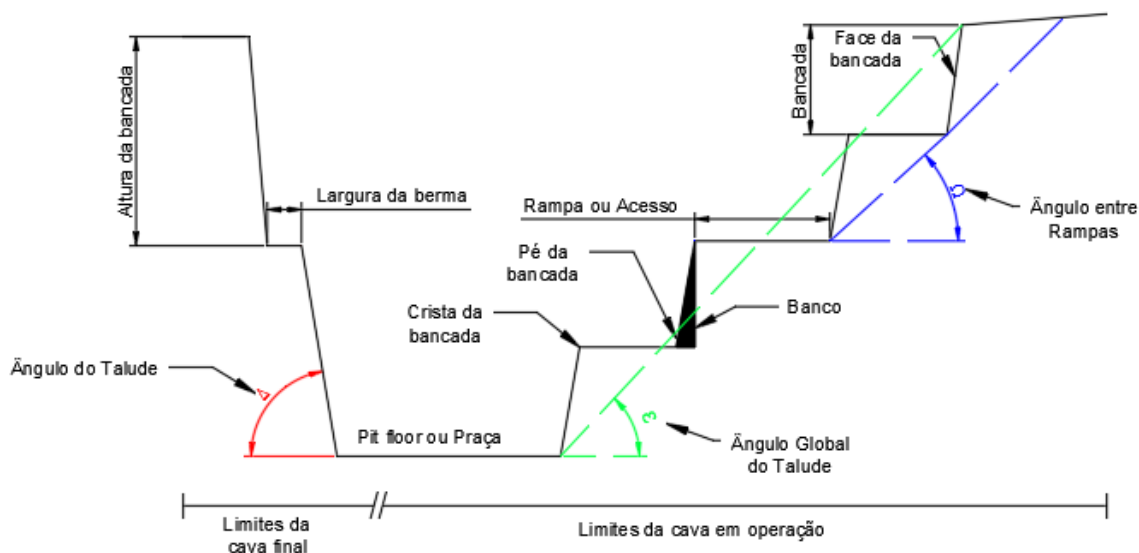


Figura 26: Elementos geométricos do talude de mina a céu aberto (modificado de Charbel, 2008).

De forma geral, o desenvolvimento da cava da mina é determinado pela produção e demanda, levando em consideração os aspectos de segurança, restrições físicas e ambientais. Logo, a manutenção da estabilidade dos taludes é fundamental em uma atividade mineira, pois contribui de forma positiva para economicidade da escavação e para as condições de segurança do trabalho.

Os aspectos econômicos da lavra, estão diretamente associados à quantidade de estéril que deve ser removida para a exposição de uma unidade de minério, relação estéril / Minério ($R_{E/M}$). Essa relação diminui com o aumento do ângulo global do talude, ou seja, altera as massas de estéril e de minério a serem lavradas. A figura 27 exemplifica a variação da $R_{E/M}$.

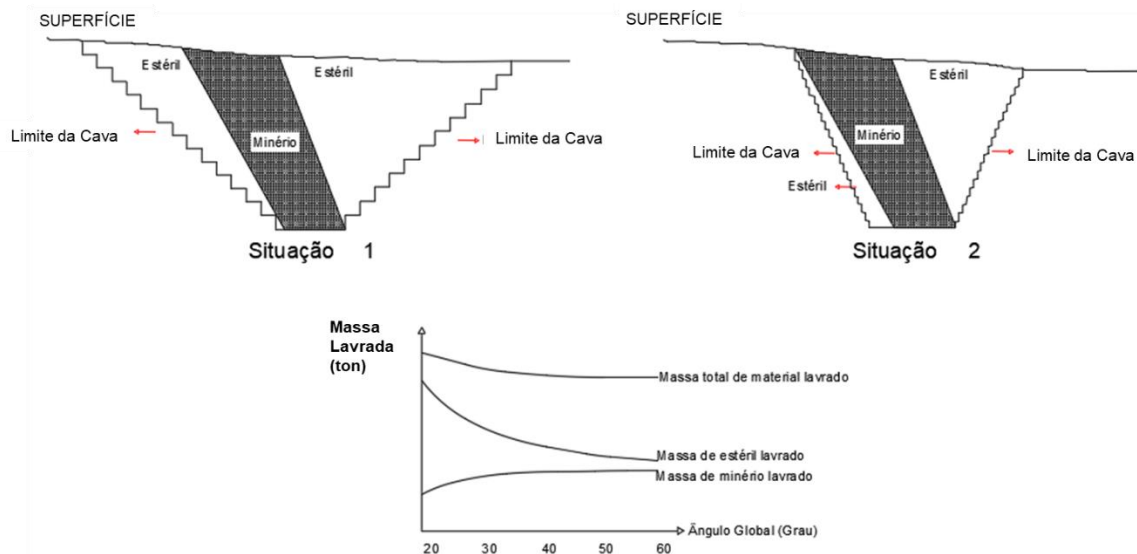


Figura 27: Variação da $R_{E/M}$ a partir da alteração do ângulo global do talude (modificado de Charbel, 2008).

Com relação à segurança do trabalho, as condições de instabilidades podem provocar indesejáveis movimentações de massa que, inclusive, refletem na economicidade da lavra, uma vez que exigirá a reconstrução de taludes e consequente aumento no custo da lavra. No entanto, os aspectos mais sensíveis, são: perdas e/ou danos em máquinas e equipamentos e, principalmente, perda de vida humana (Charbel, 2008)

3.5.1. Estabilidade de Maciços Intemperizados

A rocha, quando exposta à superfície da Terra, está sujeita aos processos de meteorização/intemperismo que, por consequência, levam à formação de maciços de regolito ou saprólito. Em climas tropicais, os processos de intemperismo agem com grande intensidade, formando espesso volume de rocha alterada que, normalmente, estão recobertas por solos residuais maduros ou lateríticos (Aydin, 2006).

Maciços rochosos são, em geral, suficientemente fortes para resistirem às forças superficiais atuantes. No entanto, após ação de agentes intempéricos ou modificação de suas características por esforços mecânicos, fragmentos poderão ser mobilizados. Portanto, intemperismo é um pré-requisito para a movimentação de massa (Bloom, 1970).

Saprólitos desenvolvidos sobre rochas ígneas e metamórficas são tipicamente caracterizados por distribuição irregular de grandes partículas (matações, pedregulhos e pedras) imersas em uma matriz de granulometria mais fina (Aydin, 2000). Um modelo proposto por Lindquist e Goodman (1994), demonstra que a quantidade de blocos associado ao saprólito pode influenciar na coesão, ângulo de atrito e modulo de deformação do maciço. Aydin (2006) acrescenta que, a presença de feições estruturais reliquiares pode influenciar e/ou dificultar a interpretação do comportamento de maciço com tais características.

West *et al.* (1991), propôs três tipos de falhas em saprólitos baseado na força relativa e proporção de blocos inseridos no perfil intemperizado. Assim, na figura 28, temos: A – envolvendo fratura intrabloco; B – através de contato bloco-matriz; C – formando ampla zona de cisalhamento. Em 1994, um modelo físico desenvolvido por Lindquist e Goodman, demonstrou que as falhas tendem a ocorrer no contato entre os blocos e a matriz. No entanto, esse modelo não levou em consideração as feições estruturais reliquiares e a influência hidrológica.

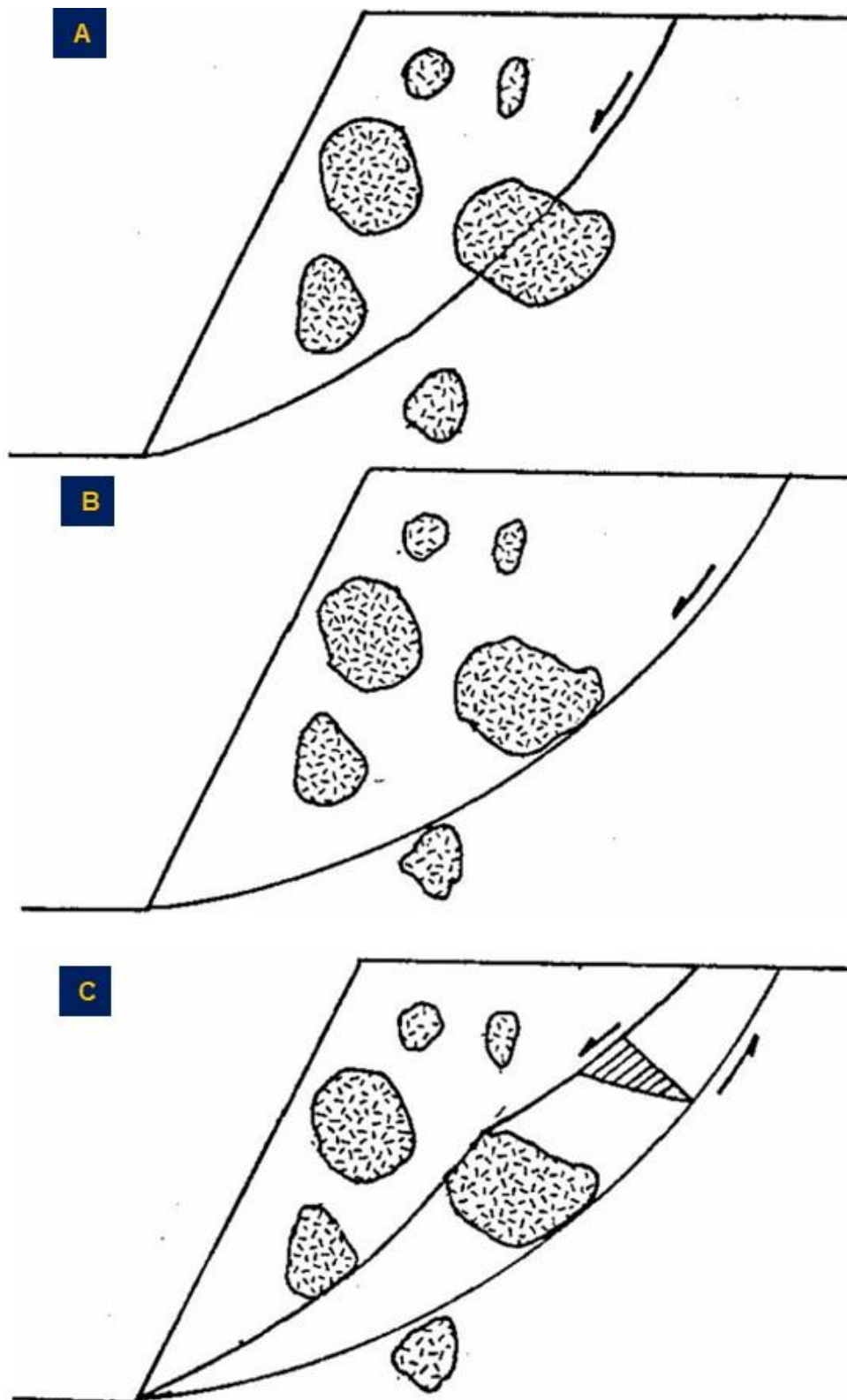


Figura 28: Modelo proposto para falhas em saprólitos, baseado na força relativa e proporção de blocos inseridos no perfil intemperizado (West *et al.*, 1991).

De acordo com Aydin (2006), embora o processo de intemperismo também afete as feições reliquias, principalmente no que tange a mineralogia e

geometria destas feições, o seu comportamento como plano de fraqueza permanecem inalterados.

Alguns estudiosos (St. John *et al.*, 1969; Vargas e Pichler, 1957; Massad e Teixeira, 1985; Cowland e Carbray, 1988; Wen e Aydin, 2003), afirmaram que uma grande proporção de deslizamentos em maciços alterados está associada às feições estruturais reliquias, representando risco significativo para taludes temporários e permanentes. Massad e Teixeira (1985) adiciona que, o risco associado a essas feições tende a aumentar quando tais estruturas são compostas por revestimento de óxidos (Fe-Mn) e substâncias húmica proveniente de horizontes superiores.

A heterogeneidade dos maciços intemperizados também exerce influência no regime hídrico subterrâneo, controlando a distribuição do fluxo de água, poropressão no maciço e reduzindo o coeficiente de atrito. Essas variáveis interferem no comportamento de encostas e taludes, pois a saturação do maciço por tempo prolongado ocasiona a perda de coesão e conseqüente movimentação de massa (Bloom, 1970).

Embora exista certa dificuldade no mapeamento de feições reliquias, é nítido a importância de levar tais estruturas em consideração. Essa prática, pode contribuir para que não ocorra de características críticas passem despercebidas no estudo de estabilidade do maciço (Aydin, 2006).

4. Comportamento Geomecânico de Maciços Rochosos

As diferentes técnicas aplicadas no reconhecimento estrutural e geomecânico exercem papel indispensável nas obras de engenharia. Neste sentido, a escolha de uma classificação que leva em consideração os parâmetros que melhor caracterizam os diferentes tipos de materiais geológicos, é fundamental. Dentro deste contexto, a geotecnia, como ciência que estuda as propriedades e comportamento dos meios geológicos, agrupa esses diferentes materiais em dois distintos grupos, mecânica dos solos e das rochas (Filho, 2014).

4.1. Rocha intacta

De acordo com Fernandes (2000), um maciço rochoso é composto por um conjunto de blocos constituídos pela rocha intacta, são ou alterada, limitados e/ou articulados por descontinuidades.

As características físicas exercem um papel preponderante na qualidade do maciço rochoso, estando principalmente associadas à sua gênese e/ou litologia, estado de alteração e coerência (Fernandes, 2000).

4.1.1. Gênese e/ou litologia

A litologia de uma rocha está associada à gênese, podendo ser ígneas ou magmáticas, sedimentares e metamórficas. Os diferentes tipos de rochas podem apresentar variação em suas características, como por exemplo: resistência, abrasividades, permeabilidade, deformabilidade e durabilidade. Dentro deste contexto, a petrografia, além de atribuir uma classificação para a rocha, é uma ferramenta indispensável na descrição das propriedades físicas, texturais, estruturais e mineralógicas (Guidicini & Nieble, 1984).

4.1.2. Alteração

As rochas estão sujeitas a um conjunto de processos intempéricos combinados que resulta na modificação de suas propriedades físicas, texturais e mineralógicas, a depender do grau de exposição. Esse processo e/ou modificações resulta na perda das características geomecânicas das rochas, diminuindo a resistência, aumentando a deformabilidade e modificando as propriedades de porosidade.

Para a caracterização do intemperismo do maciço rochoso, a *International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering* - ISRM (1981) recomenda a avaliação do afloramento em campo em comparação com as descrições apresentadas na tabela 1.

Tabela 1: Estado de intemperismo para maciços rochosos

W	Descrição	Características do Material
---	-----------	-----------------------------

W6	Solo residual maduro	Material totalmente transformado em solo.
W5	Rocha completamente alterada (friável) - saprolito	Rocha descomposta para solo estruturado e/ou desagregado num solo residual
W4	Rocha intensamente alterada	Alteração mineralógica muito acentuada, matriz totalmente oxidada e cores muito modificadas.
W3	Rocha moderadamente alterada	A matriz apresenta-se descolorida e a foliação realçada pelo intemperismo.
W2	Rocha levemente alterada	Mudanças na cor original da matriz rochosa, leve descoloração e oxidação na matriz e ao longo das descontinuidades.
W1	Rocha sã	Alteração mineralógica nula a incipiente. Minerais preservam brilho original, cor e clivagem. Eventual descoloração nas descontinuidades. Foliação visível e selada. Resistência original da rocha não afetada pela alteração.

Fonte: Adaptado de ISRM, 1981

4.1.3. Coerência

A coerência da rocha está associada ao grau de intemperismo, sendo definida com base em propriedade de tenacidade, dureza e friabilidade. É uma importante característica que pode ser determinada através de exames tátil-visual, resistência ao impacto do martelo e/ou risco com lâmina de aço (Fernandes, 2000). Assim, de acordo com as solicitações, a rocha pode ser qualificada de acordo com a tabela 2.

Tabela 2: Classificação da propriedade de coerência da rocha.

Rocha	Símbolo	Características
Muito coerente	C1	Quebra com dificuldade ao golpe de martelo O fragmento possui bordas cortantes que resistem ao corte por lâmina de aço Superfície dificilmente riscada por lâmina de aço
Coerente	C2	Quebra com relativa facilidade ao golpe do martelo O fragmento possui bordas cortantes que podem ser abatidas pelo corte com lâmina de aço Superfície riscável por lâmina de aço
Pouco coerente	C3	Quebra facilmente ao golpe de martelo As bordas do fragmento podem ser quebradas pelo

		pressão dos dedos A lâmina de aço provoca um sulco acentuado na superfície do fragmento
Friável	C4	Esfarela ao golpe do martelo Desagrega sob pressão dos dedos

Fonte: Fernandes (2000)

A partir do grau de coerência é possível obter uma estimativa de resistência à compressão uniaxial, conforme tabela 3 sugerida pela ISRM (1981).

Tabela 3: Classificação da propriedade de resistência da rocha.

R	Descrição	Características do Material	Resistência Uniaxial Estimada (MPa)	Point Load Index (MPa)
R0	Solo estruturado coesivo	É facilmente atravessado pela lâmina do canivete ou pela ponta fina do martelo de geólogo;	< 1,00	**
R1	Rocha muito branda – saprólito friável	Desintegra-se facilmente sob o impacto do martelo de geólogo; Pode ser riscado e raspado facilmente pela lâmina do canivete;	1,00 - 5,00	**

R2	Rocha branda	Quebra-se sob um único impacto do martelo de geólogo; A lâmina do canivete provoca sulco acentuado na superfície do fragmento;	5,00 - 25,00	**
R3	Rocha medianamente resistente	Quebra-se sob poucos golpes firmes do martelo de geólogo; Risca com dificuldade com a lâmina do canivete;	25,00 - 50,00	1,00 - 2,00
R4	Rocha resistente	Requer alguns golpes do martelo de geólogo para ser quebrado; Difícilmente riscado pela lâmina do canivete;	50,00 - 100,00	2,00 - 4,00
R5	Rocha muito resistente ou extremamente resistente	Quebra-se com muitos golpes do martelo de geólogo; Difícilmente riscado pela lâmina do canivete;	> 100	> 4,00
R6	Rocha extremamente resistente	A amostra pode apenas lascada com o martelo geológico.	> 250	> 10

Fonte: Adaptado de ISRM (1981)

4.2. Descontinuidades e suas características

De acordo com Hudson e Harrison (1997), o maciço rochoso é composto pela associação de rocha intacta e por descontinuidades naturais. As porções de rocha intacta são compostas por agregados de um ou mais minerais formados por processos geológicos; já as descontinuidades naturais são feições que interrompem a continuidade física do volume de rocha e, geralmente, são provocadas por processos tectônicos.

Conforme figura 29, a ISRM (2007-2014) relaciona as principais características das descontinuidades levadas em consideração e que afetam o comportamento dos maciços rochosos, são elas: orientação, espaçamento, persistência, resistência das paredes, rugosidade, preenchimento, abertura e percolação.

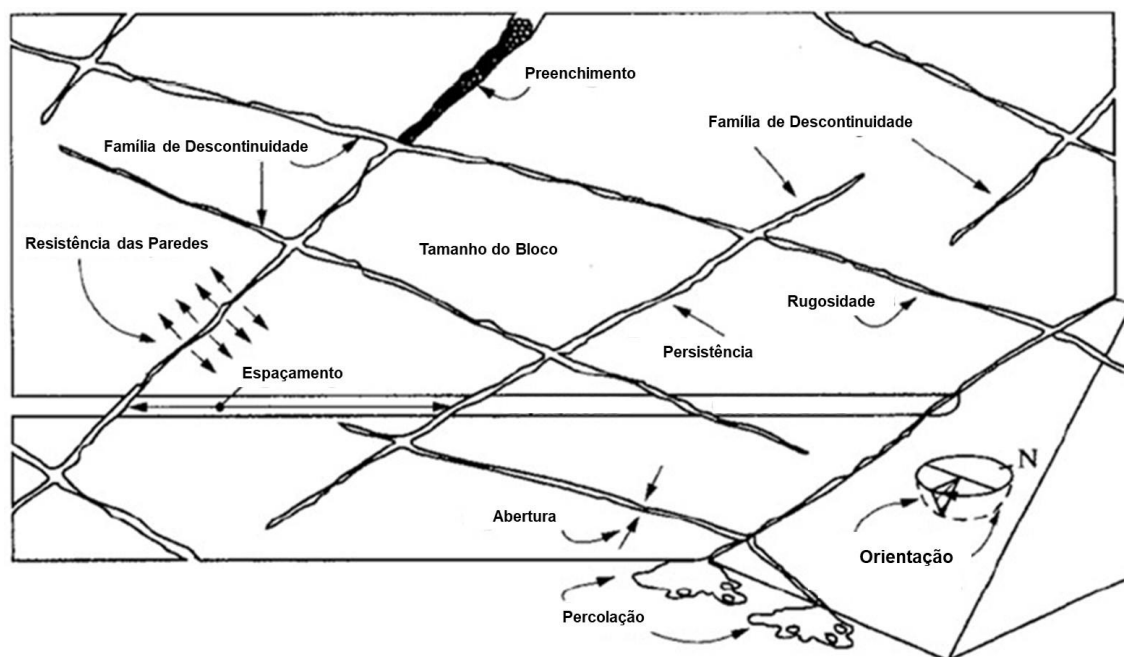


Figura 29: Caracterização de Feições Estruturais (modificado ISRM, 2007-2014).

4.2.1. Orientação

A orientação ou atitude de uma descontinuidade no espaço é definida pela direção (*strike*), medida a partir do Norte, no sentido horário, e pelo mergulho (*dip*) da linha mais inclinada da descontinuidade em relação à horizontal, a figura 30 exemplifica esses conceitos. A atitude de uma descontinuidade pode ser determinada por vários métodos, o mais utilizado é a medição através de bússola geológica. Tais medidas, normalmente são representadas por projeção estereográfica.

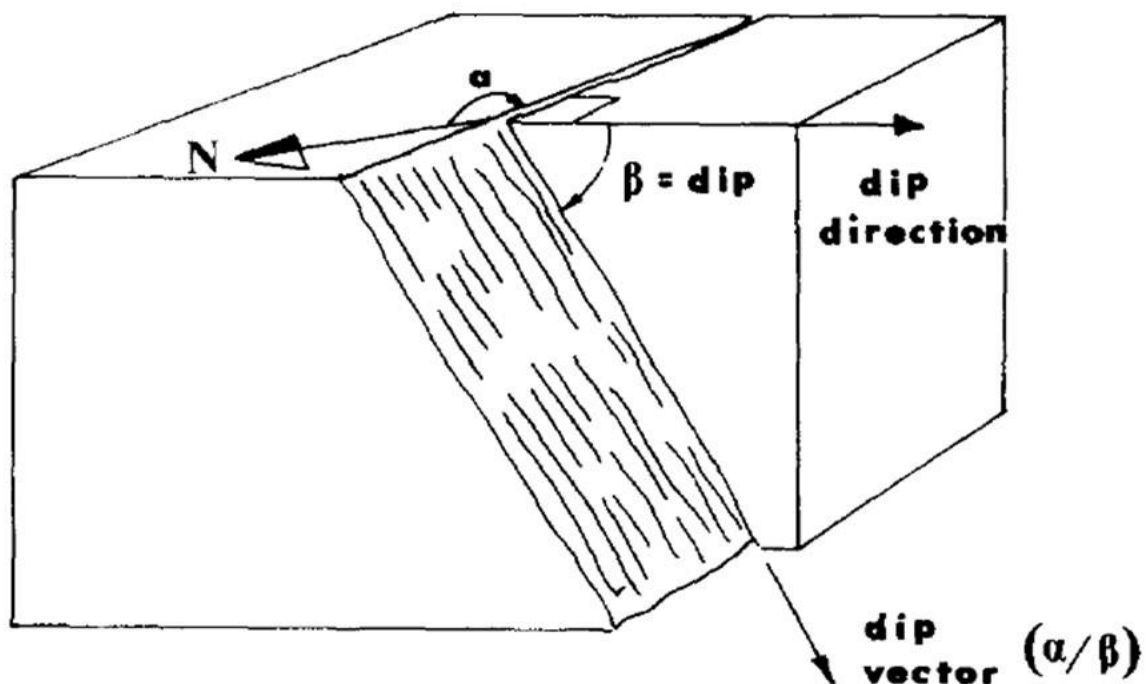


Figura 30: Orientação ou atitude de uma descontinuidade no espaço (ISRM, 1978)

Através de análise das distribuições das descontinuidades num maciço rochoso, a orientação possibilita a identificação das famílias de descontinuidades que podem definir blocos de rocha, podendo estes estarem estáveis ou não (ISRM, 1978).

4.2.2. Espaçamento

Espaçamento ou frequência é definido como a distância entre descontinuidades adjacentes, pertencentes à mesma família ISRM (1978). A tabela 4, apresenta a descrição dos espaçamentos das descontinuidades.

Tabela 4: Descrição do espaçamento das descontinuidades.

Descrição	Espaçamento (cm)
Extremamente próximos	< 20
Muito próximos	20 - 60
Próximas	60 - 200
Espaçamento moderado	200 - 600
Espaçamento amplo	600 - 2000
Espaçamento muito amplo	2000 - 6000
Extremamente espaçadas	> 6000

Fonte: Adaptado de ISRM (1978).

O espaçamento das descontinuidades tem influência na percolação de água e conseqüente saturação do maciço. De acordo com Giani (1992), esse parâmetro define a dimensão dos blocos formados pelas intersecções das famílias de descontinuidades e conseqüente estabilidade do maciço, uma vez que as forças que agem a favor da estabilidade dos blocos são dependentes dos seus volumes.

4.2.3. Persistência

A persistência é definida como o comprimento da descontinuidade medida em um plano, sendo um dos parâmetros que mais influenciam no comportamento mecânico e hidráulico de um maciço (ISRM,1978), conforme tabela 5.

A depender da escala, a persistência pode provocar rupturas que variam de pontual a global. Por esse motivo, as descontinuidades mais extensas devem ter prioridade nos estudos de estabilidade, pois são elas que irão condicionar os principais planos de rupturas em um maciço.

Tabela 5: Descrição da persistência.

Descrição	Espaçamento (m)
Muito baixa	< 1
Baixa	1 – 3
Média	3 - 10

Alta	10 - 20
Muito Alta	> 20

Fonte: Adaptado de ISRM (1978).

4.2.4. Resistência das paredes

A resistência é uma medida de compressão das paredes que, devido às alterações, normalmente possuem resistência inferior à rocha. A resistência das paredes pode ser determinada através do Martelo de Schimidt ou por meio de tabelas comparativas (ISRM, 1978). No entanto, para esse trabalho, a resistência das paredes das descontinuidades foi considerada a mesma da rocha, conforme parâmetros demonstrados na tabela 3.

4.2.5. Rugosidade (Jr)

A rugosidade está associada ao nível de irregularidades presente nos planos das descontinuidades. Esse parâmetro influencia a resistência ao cisalhamento, principalmente quando as descontinuidades se encontram fechadas. Por outra perspectiva, a resistência ao cisalhamento diminui com o aumento da abertura e/ou a presença de preenchimento de baixa coesão (ISRM, 1978).

Barton (1973) propôs um método para estimar a resistência ao cisalhamento (τ) de uma junta fundamentado no coeficiente de rugosidade (JRC). Esse coeficiente é expresso através da seguinte relação empírica:

$$\frac{\tau}{\sigma_n} = \tan \left[JRC_{Log} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_r \right]$$

Nessa equação, temos:

ϕ_r = ângulo de atrito residual

σ_n = tensão normal atuante na junta

JCS = resistência à compressão simples das paredes, que normalmente é obtido através do martelo Martelo de Schmidt.

Para determinar o ângulo de atrito residual, Barton & Choubey (1977), sugeriram que ϕ_r pode ser estimado a partir da seguinte equação:

$$\phi_r = (\phi_b - 20) + 20 (r/R)$$

onde, temos:

ϕ_b = ângulo de atrito básico da rocha.

R = número de rebote do martelo de Schimdt

r = número de rebote do martelo de Schimdt sobre a parede da junta em estado natural.

Para descontinuidades sem alteração ($\phi_r = \phi_b$), o coeficiente de rugosidade pode ser estimado de acordo com os perfis apresentado na figura 31, conforme Barton (2021).

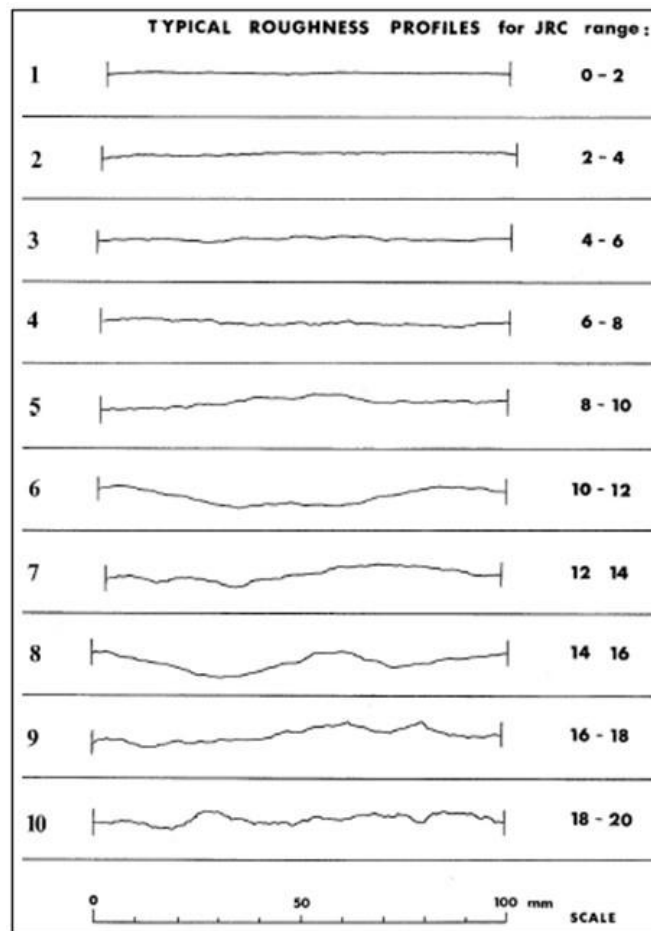


Figura 31: Perfis de rugosidade comparativo com a aparência da superfície da descontinuidade e o valor do JRC correspondente (Barton,2021).

De acordo com Barton & Bandis (1982), os valores de JRC e JCS são influenciados em decorrência da escala de extensão da descontinuidade. Assim, para mitigar os efeitos, propuseram uma correção através das seguintes equações:

$$\text{Equação 1: } JRC_n = JRC_0 \left(\frac{L_n}{L_0} \right)^{-0.02JRC_0}$$

$$\text{Equação 2: } JCS_n = JCS_0 \left(\frac{L_n}{L_0} \right)^{-0.03JRC_0}$$

na qual, temos:

0 = escala de laboratório

n = escala de campo

L = comprimento da linha de amostragem

Para essa metodologia, na figura 32 é apresentada o perfil típico das descontinuidades.

Relation between J_r and JRC_n Subscripts refer to block size (cm)		J_r	JRC_{20}	JRC_{100}
I	rough	4	20	11
	smooth	3	14	9
	slickensided	2	11	8
Stepped				
IV	rough	3	14	9
	smooth	2	11	8
	slickensided	1.5	7	6
Undulating				
VII	rough	1.5	2.5	2.3
	smooth	1.0	1.5	0.9
	slickensided	0.5	0.5	0.4
Planar				

Figura 32: JRC_{20} e JRC_{100} correspondem o valor estimado para o índice de rugosidade levando em consideração um comprimento de 20 cm e de 100 cm (Barton, 2021).

4.2.6. Preenchimento

É o material que preenche total ou parcialmente o espaço entre as paredes das descontinuidades, podendo ser composto por diversos tipos de materiais, desde os mais brandos até os mais resistentes (ISRM, 1978).

O tipo de preenchimento é um fator importante na caracterização de uma descontinuidade pois, a depender do tipo, pode colaborar com a percolação da água nas descontinuidades, diminuindo a resistência ao cisalhamento.

4.2.7. Abertura

A abertura pode ser definida como a distância média entre as paredes da descontinuidade, podendo estar preenchida por ar, água ou outros materiais. Esse parâmetro pode variar de acordo com a zona do maciço rochoso, podendo apresentar abertura na superfície e estar completamente fechada em profundidade (ISRM, 1978). Conforme tabela 6, temos:

Tabela 6: Descrição das aberturas.

Descrição	Espaçamento (mm)
Muito fechada	< 0,1
Fechadas	0,1 - 0,25
Parcialmente abertas	0,25 - 0,5
Abertas	0,5 - 2,5
Cavernosa	> 1000

Fonte: Adaptado de ISRM (1978).

4.2.8. Percolação

A presença de água no maciço ou ao longo das descontinuidades é um dos principais fatores que condicionam situações de instabilidade. Normalmente, essa situação está associada à saturação do maciço pela precipitação e/ou elevação do nível freático, sendo uma tarefa difícil diferenciar a surgência de água que percola pelas fraturas e a que escoia superficialmente (ISRM, 1978).

4.3. Sistemas de Classificação Geomecânica

Os sistemas de classificações surgiram há mais de 100 anos desde que Ritter (1879) desenvolveu um método empírico para construção de túneis. Posteriormente, com a evolução dos trabalhos e necessidade de outras intervenções, ao longo dos anos, novos sistemas foram criados. O desenvolvimento deste trabalho foi realizado com base nos sistemas *Rock Quality Designation* (RQD), *Rock Mass Rating* (RMR), *Rock Mass Quality* (Q) e *Geological Strength Index* (GSI).

Esses sistemas têm como base o levantamento sistemático de um conjunto de propriedades que interessa caracterizar e que podem influenciar o comportamento do maciço.

4.3.1. Sistema RQD

O RQD (*Rock Quality Designation*) é um método de classificação baseado no fraturamento de maciços rochosos. Esse método foi criado por Deere (1967) e foi definido a partir da caracterização de testemunhos de sondagem realizadas com recuperação contínua de amostras.

O RQD é determinado a partir da soma dos fragmentos com comprimento maior que 10 cm dividido pelo comprimento total da manobra de sondagem, conforme equação 3.

$$\text{Equação 3: } RQD = \frac{\sum \text{Partes do testemunho} > 10 \text{ cm}}{\text{Comprimento total da manobra}} \times 100$$

Em função do RQD, Deere (1967) elaborou uma classificação da qualidade do maciço, conforme tabela 7.

Tabela 7: Classificação dos maciços em função do RQD.

RQD	Qualidade do Maciço Rochoso
0 – 25%	Muito Fraco
25 – 50%	Fraco
50 – 75%	Razoável
75 – 90%	Bom
90 – 100%	Excelente

Fonte: Deere, 1967.

A sondagem é um método de amostragem dispendioso, impossibilitando, em alguns casos, a execução deste tipo de atividade para auxiliar na caracterização do maciço rochoso. Pensando nisso, Palmstrom (1982) elaborou uma estimativa do RQD a partir do e o índice volumétrico de juntas (J_v), que representa o grau de fraturamento do maciço. O (J_v) consiste no somatório do número de descontinuidades por unidade de comprimento de cada família de descontinuidade. E a relação é dada pela equação 4:

$$\text{Equação 4: } RQD \approx 115 - 3,3 \times J_v$$

O RQD apresenta desvantagem em relação ao índice volumétrico, pois é dependente da orientação da perfuração e/ou amostragem, podendo, desta forma, apresentar variação significativa nos valores em função da orientação do furo de sondagem.

4.3.2. Sistema RMR

O sistema *Rock Mass Rating* (RMR) foi criado em 1973 por Bieniawski, e teve como base uma vasta experiência colhida em obras subterrâneas. Este sistema tem sido aprimorado ao longo do tempo através da análise de um crescente número de casos práticos. Para este estudo, foi adotado a versão de 1989.

A classificação proposta é norteadada por seis parâmetros que o autor considerou serem os que melhor descrevem o comportamento do maciço rochoso. Os parâmetros levados em consideração, são:

1. Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta;
2. RQD (“Rock Quality Designation”);
3. Espaçamento das descontinuidades;
4. Condição das descontinuidades;
5. Influência da água;
6. Orientação das descontinuidades.

Esses parâmetros são caracterizados através de mapeamento sistemático de campo que, normalmente, são armazenados em um banco de dados e/ou planilhas. A tabela 2 do apêndice B demonstra a distribuição dos pesos aos cinco primeiros parâmetros. Para a condição das descontinuidades, caso exista uma caracterização detalhada, a tabela 1 do apêndice B pode auxiliar na determinação do peso relativo.

Após atribuir pontuações a cada um dos parâmetros fixos, o maciço é classificado com base no somatório dos valores determinados, denominado índice de RMR. A partir deste índice é possível enquadrar o maciço em uma das classes que melhor represente suas características (Bieniawski, 1989). A tabela 8 apresenta a variação da qualidade do maciço com base nas pontuações atribuídas.

Tabela 8: Classes de maciços.

Soma dos pesos (RMR)	100-81	80-61	60-41	40-21	≤ 20
Classe do Maciço	I	II	III	IV	V
Descrição	Muito Bom	Bom	Regular	Ruim	Muito ruim

Fonte: Bieniawski (1989).

4.3.3. Geological Strength Index (GSI)

Devido às dificuldades técnicas e econômicas para estimar, através de ensaios *in situ*, parâmetros importantes do critério de Hoek & Brown, Hoek (1994) desenvolveram o sistema Geological Strength Index (GSI) ou Índice de Resistência Geológica. Esse método permitiu a obtenção de parâmetros necessários para a estimativa da resistência de deformabilidade de maciços rochosos em diferentes condições geológicas e, devido a algumas semelhanças com os sistemas RMR e Sistema-Q, o método foi também empregado para a classificação de maciços rochosos (Marinos *et al.*, 2005).

A determinação do GSI leva em consideração as características litológicas, estruturais e, principalmente, as condições das descontinuidades, tamanho e forma dos blocos. O valor do GSI é estimado em campo através dos elementos da figura 33.

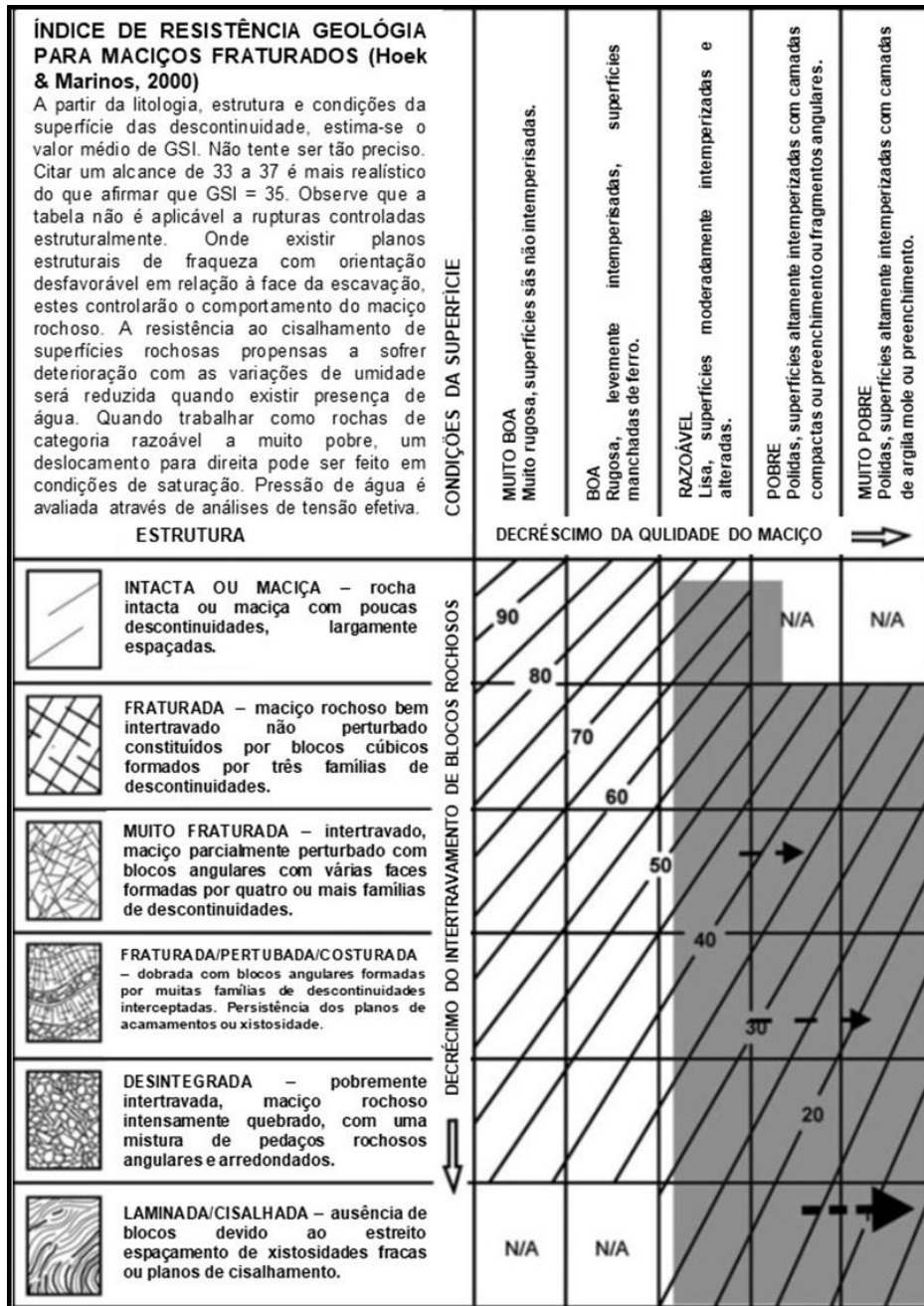


Figura 33: Estimação dos valores de GSI baseada nas condições geológicas do maciço rochoso (Hoek & Brown 1997).

4.4. Caracterização Geológico-Geotécnica

Durante o levantamento de campo, realizado entre 28/04/2022 e 07/07/2022, foram mapeadas 226 janelas espaçadas por uma distância média de 20 m. Para cada uma delas foi realizado registro fotográfico, de coordenadas UTM (SAD 69 – fuso 22) e de feições geodinâmicas.

A caracterização geológico-geotécnica foi realizada com base nas recomendações sugeridas pela ISRM, NBR 6502 e nos critérios estabelecidos pelo sistema de classificação maciço rochoso RMR (Bieniawski, 1989). Além disso, esse trabalho foi norteado pelas boas práticas definidas pela Anglo American em conjunto com empresas parceiras. Os parâmetros observados para solo, saprólito e rocha estão dispostos na tabela 9.

Tabela 9: Parâmetros caracterizados durante o mapeamento.

Solos e Saprolito	Maciço Rochoso
Litologia	Litologia
Gêneses do material	Grau de Resistência (R)
Cor	Grau de Intemperismo (W)
Tonalidade	Espaçamento das descontinuidades
Grau de Resistência (R)	Geological Strength Index (GSI)
Grau de Intemperismo (W)	Feições Geodinâmicas
Textura (granulometria)	Exsudação de água
Plasticidade	-
Estimativa da fração grossa e fina	-
Granulometria da fração grossa e fina	-

Nota: Os parâmetros de porcentagem da fração e granulometria só foram determinados quando aplicáveis e a caracterização dos parâmetros de solo foi realizado de acordo com a NBR 6502.

Para o levantamento das feições estruturais foi utilizada uma bússola da marca Brunton (modelo *Geo Pocket Transit -F-5010*), regulada com declinação magnética de $-21,8^\circ$ e o padrão de notações de atitudes do tipo Viena, onde são anotadas o rumo do mergulho/ mergulho (*dip direction/dip*).

4.4.1. Dunito

As restritas exposições de dunito apresentaram resistência variando entre R5-R4, intemperismo entre W3-W2 e duas principais famílias de descontinuidades que, em geral, foram qualificadas com rugosidade ondulada lisa e/ou áspera, espaçamento variando entre 1,5 - 500 cm, persistência entre 1 - 20 m, abertura

entre 0,5 - 20 mm e preenchimento caracterizado como silicático, argiloso ou as paredes das aberturas exibiam apenas descoloração proveniente da alteração de minerais primários.

Para essa unidade, foi calculado valores para Jv em torno de 1,9 a 42 que, conseqüentemente, refletem valores para RQD variando entre 38% e 100%. Dentro deste contexto, uma análise dos valores interpretados para o GSI, que se distribuem em torno de 35-55, demonstrando que a qualidade do maciço é bastante heterogênea. A figura esquemática 34 ilustra o afloramento de dunito e os valores interpretados para o GSI.



Figura 34: Afloramento de dunito parcialmente serpentinizado e, ao lado, plotagem dos valores atribuídos para o GSI (Ponto 6).

4.4.2. Boulder de Dunito– BDD

O *boulder* de dunito possui características geomecânicas similares ao dunito, uma vez que a principal diferença entre ambos é o grau de alteração.

Para essa unidade, a resistência varia entre R4 - R3 e o intemperismo entre W3-W2. Sobre as principais famílias de descontinuidades, as persistências mapeadas variam entre 1 - 5 m, espaçamento entre 0,3 - 700 cm, aberturas entre 0,5 - 50 mm e rugosidade das paredes alternando entre plana e ondulada, podendo haver variação entre lisa ou áspera. Com relação aos preenchimentos, foram observados silicáticos, rocha desintegrada ou as paredes das aberturas exibiam apenas descoloração proveniente da alteração de minerais primários.

Os valores de J_v calculados para o *boulder* estão entre 0,15 e 76 que, assim como nos dunitos, refletem valores bastantes variáveis para o RQD. Além disso, uma análise dos valores interpretados para o GSI, que se distribuem em torno de 25-60, reflete a mesma heterogeneidade observada nos dunitos. A figura esquemática 35 ilustra o afloramento ilustra esse cenário.

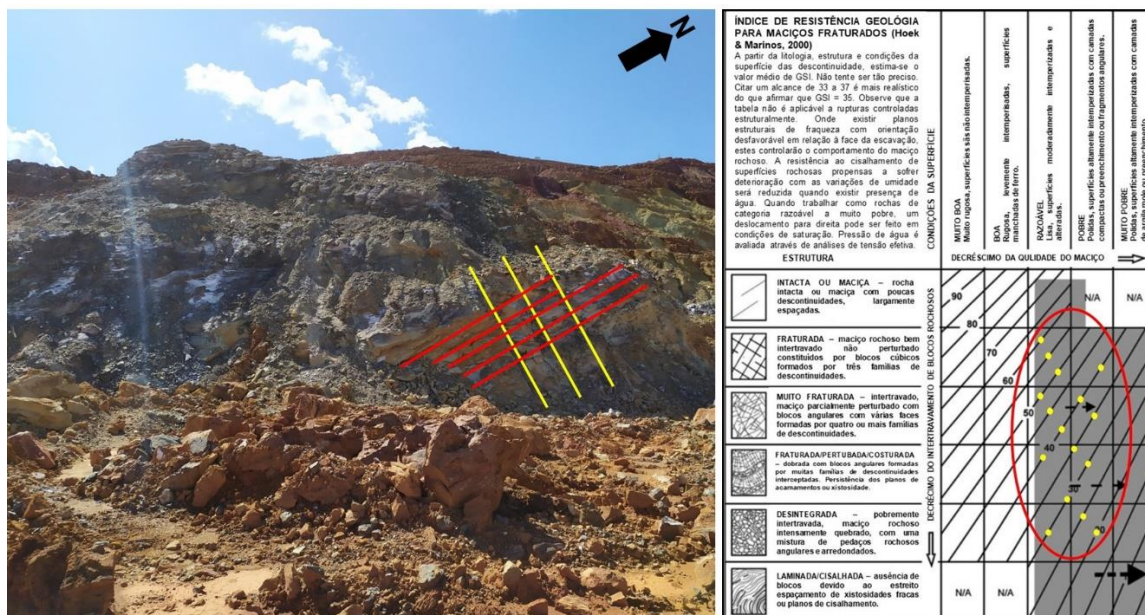


Figura 35: Afloramento de *boulder* e, ao lado, plotagem dos valores atribuídos para o GSI (Ponto 5).

4.4.3. Minério Básico – SPMB

O minério básico apresenta grau de resistência predominantemente R2, enquanto o nível de intemperismo varia entre W4 e W5. Essa rocha branda, apresenta descontinuidade caracterizada por persistências <5 m, espaçamento variando entre 0,5 - 5 cm, aberturas variando entre 0,3 - 50 mm e rugosidade das paredes alternando entre plana lisa e ondulada, podendo ocorrer variação entre lisa ou áspera. Tais descontinuidades normalmente são preenchidas por materiais arenosos, siltosos, argilosos e/ou rocha desintegrada.

Apesar dessa unidade ser, predominantemente, caracterizada por estruturas reliquias, para alguns pontos foram calculados os valores de J_v e estimado valores para o GSI, conforme figura esquemática 36.



Figura 36: Afloramento de *boulder* e, ao lado, plotagem dos valores atribuídos para o GSI (Ponto 195).

4.4.4. Minério Ácido – SPMA

O minério ácido é o material geotecnicamente de menor qualidade presente na área de estudos e, atualmente, está associado às grandes movimentações de massa. Apresenta resistência variando entre R0 até R2, grau de intemperismo predominantemente W5, textura alternando entre silto-argilosa e argilo-siltosa e plasticidade variando entre média a alta.

Apesar do estado de alteração já avançado desta unidade, é possível observar a presença de várias feições reliquias, como juntas, falhas e estrias. A plasticidade e friabilidade do material, aliada à presença constante de gretas de contração e erosões lineares do tipo sulco e ravina sugerem a presença de argilominerais expansivos. Aliado a isso, o menor espaçamento entre discontinuidades resulta em um maciço muito fragmentado e/ou friável, e, portanto, de baixa qualidade. Em alguns locais, esse material friável está acondicionado em grandes estruturas dobradas, conforme figura esquemática 37.



Figura 37: Minério ácido, friável, acondicionado em superfície dobrada de calcedônia (Ponto 61).

As principais famílias de descontinuidades reliquias foram classificadas com rugosidade plana ou ondulada lisa, espaçamento menor ou igual a 2 m, persistência entre 1 - 4 m, espaçamento entre 0,1 - 200 cm, aberturas entre 0,2 - 50 mm e preenchimento caracterizado como arenoso, argiloso, siltoso e rocha desintegrada. A figura esquemática 38, traz alguns exemplos das estruturas reliquias mapeadas na área de estudos.

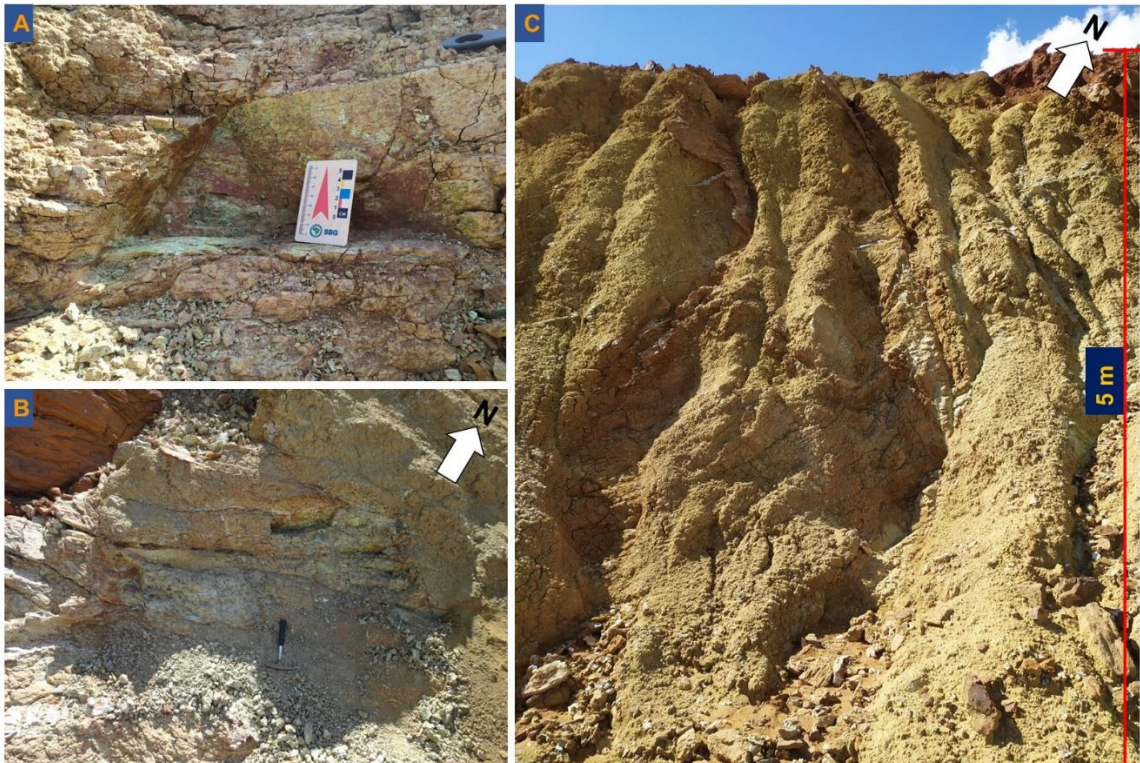


Figura 38: Estruturas reliquias em minério ácido. A – ponto 17; B – ponto 84; C – ponto 151.

4.4.5. Minério Ferruginoso – SPMF

O minério ferruginoso e o estéril interno apresentam características geotécnicas muito semelhantes e, apesar do nível avançado de intemperismo, assim como no minério ácido, é possível observar estruturas reliquias associadas preenchidas por material silicático e argila.

Para estas unidades, em geral, foram observadas texturas variando entre silto-argilosa, argilo-arenosa e, nas porções mais avermelhadas, textura argilo-siltosa. Dentro deste contexto, a plasticidade pode variar entre média a alta nas porções mais argilosas, enquanto as mais arenosas apresentam plasticidade baixa. Com relação à resistência e o intemperismo, para estes materiais foram observadas variações entre R0-R1 e W6-W5. A figura 39 ilustra algumas características destes materiais.

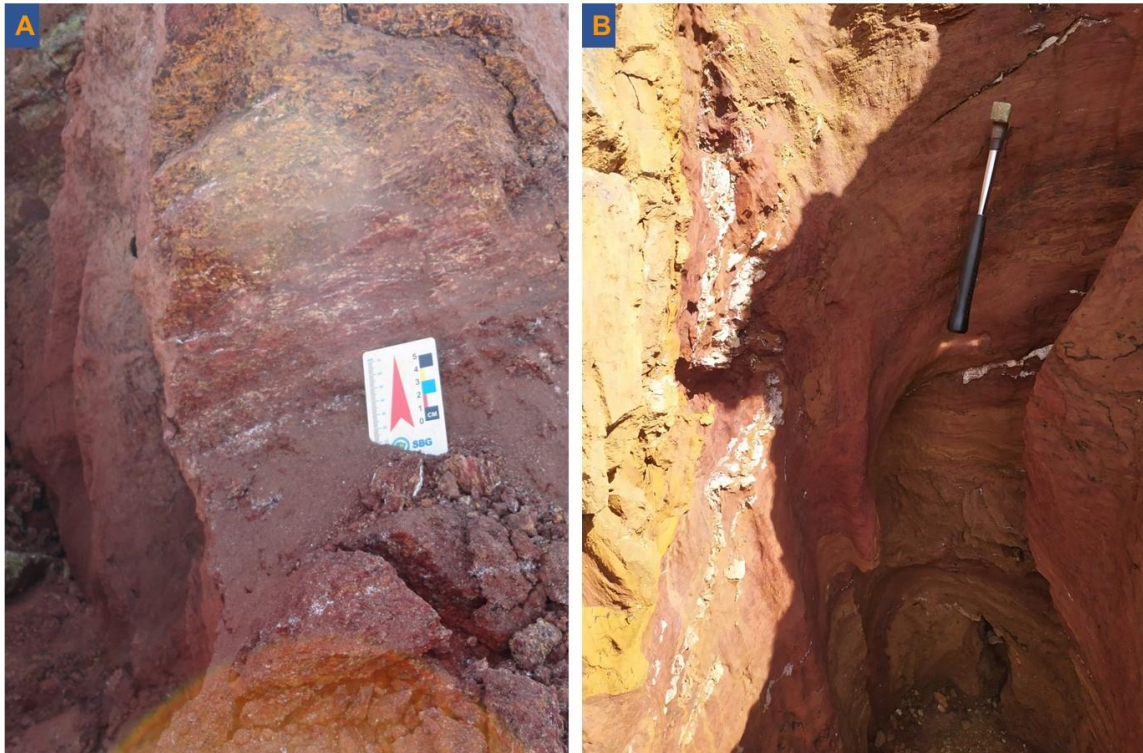


Figura 39: Minério Ferruginoso em estado de alteração avançada e baixa resistência. A – ponto 163; B – ponto 33.

Em alguns pontos, esse material faz contato solo-rocha com a calcedônia. O mapeamento e a caracterização desse tipo de contato são importantes, pois essas unidades apresentam resistência distintas ao deslizamento. Isso ocorre, principalmente, devido as diferenças reológicas que na calcedônia refletem como propriedades de resistência (ângulo de atrito e coesão) ao deslizamento maior do que no saprólito. A figura 40, traz um exemplo de contato solo-rocha na área de estudos.

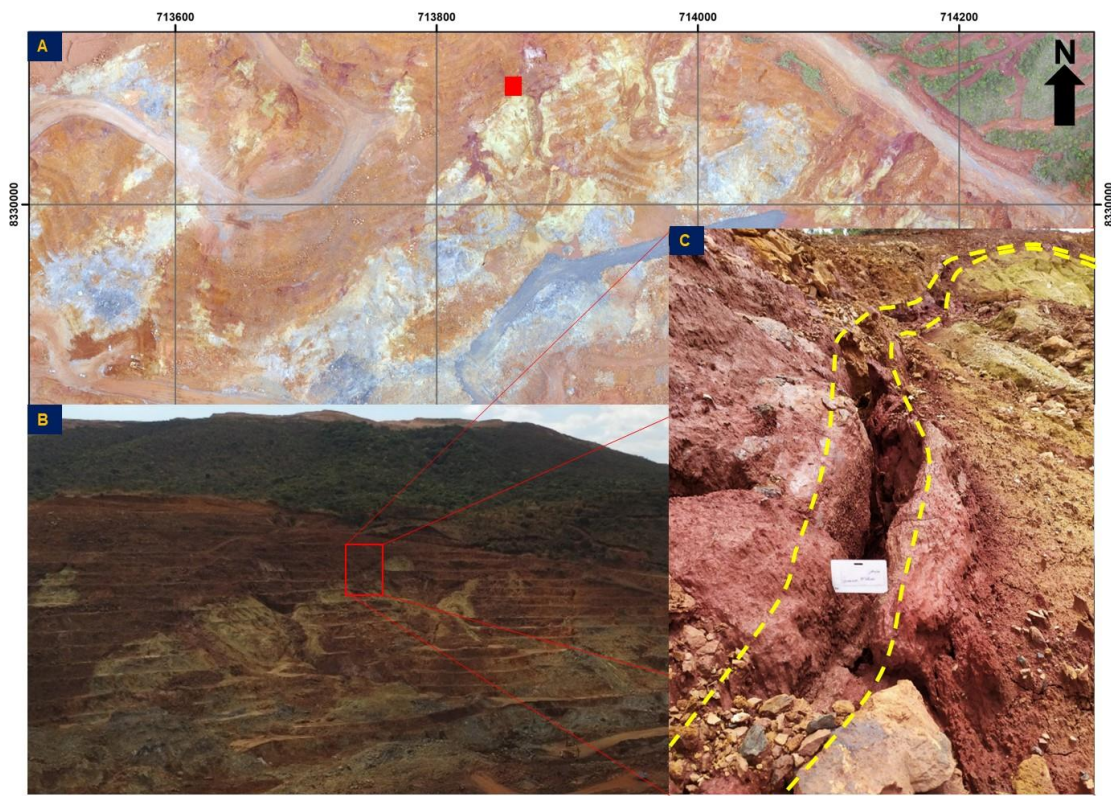


Figura 40: A – Vista em planta da área; B – Vista em perspectiva; C – Contato solo-rocha caracterizado por descontinuidade persistente e abertura de 10 cm (Ponto 226).

4.4.6. Calcedônias

No que diz respeito às calcedônias – *hard* e *soft*, embora, em alguns casos, apresentem boas características geotécnicas, na área de estudo foi observada a presença significativa deste tipo de material associado às movimentações de massa de grandes proporções, conforme pode ser observado na figura 41.

A calcedônia *hard* (CH) apresenta resistência variando em torno de R4 a R5 e intemperismo entre W2 e W3. Com relação às descontinuidades, apesar do emprego de explosivos para desmonte e/ou remoção desse material, em algumas janelas foi possível mapear e caracterizar tais estruturas. Assim, as descontinuidades associadas a essa unidade apresentam persistências variando entre 1 - 5 m, aberturas variando entre 0,5 - 50 mm e rugosidade das paredes alternando entre plana, ondulada ou recortada, podendo haver variação entre lisa ou áspera. Com relação aos preenchimentos, foram observados impermeáveis, argilosos, areno-siltosos, rocha desintegrada ou as paredes das aberturas exibiam apenas descoloração associada a processos intempéricos.

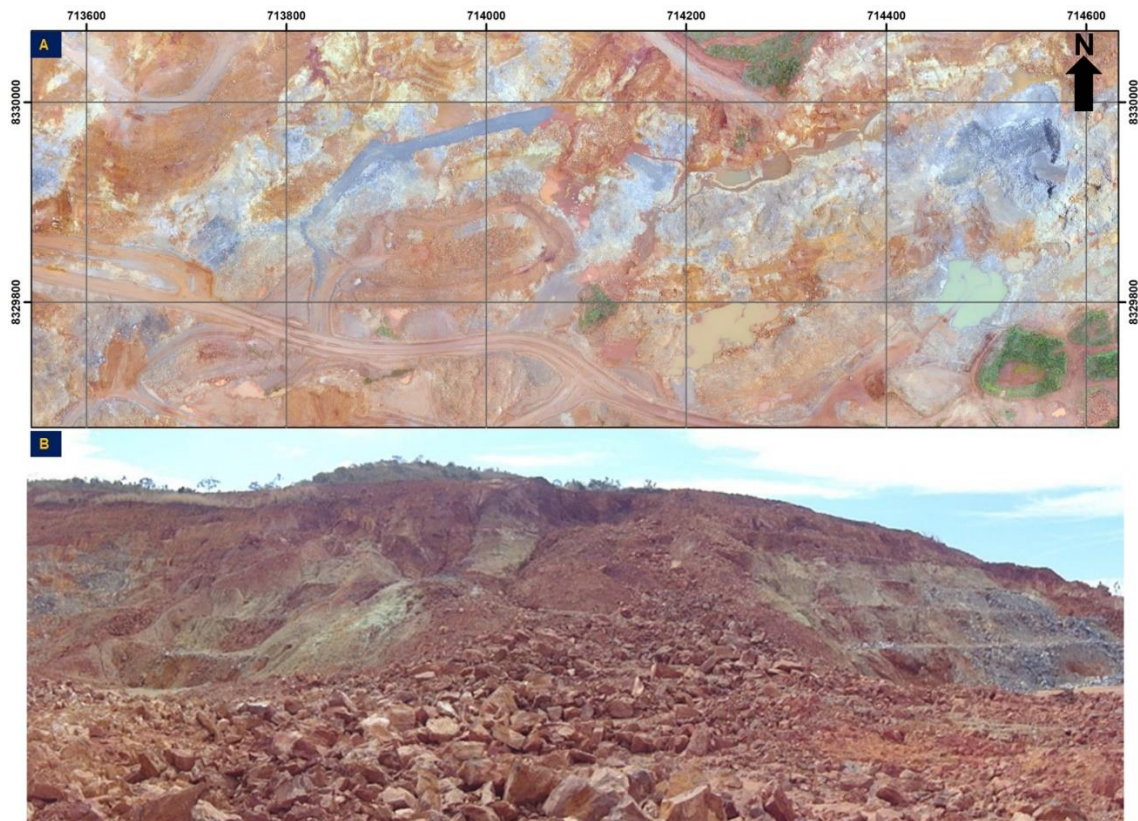


Figura 41: A – vista em planta da área; B – deslizamento na porção NE da cava (Ponto 192).

Os valores de J_v calculados para a calcedônia *hard* estão em torno de 36, já os valores interpretados para o GSI se distribuem em torno de 20 - 50. Esses resultados demonstram que, assim como para a rocha ultrabásica, essa unidade também apresenta expressiva heterogeneidade. A figura esquemática 42, demonstra a distribuição de alguns valores interpretados para o GSI.

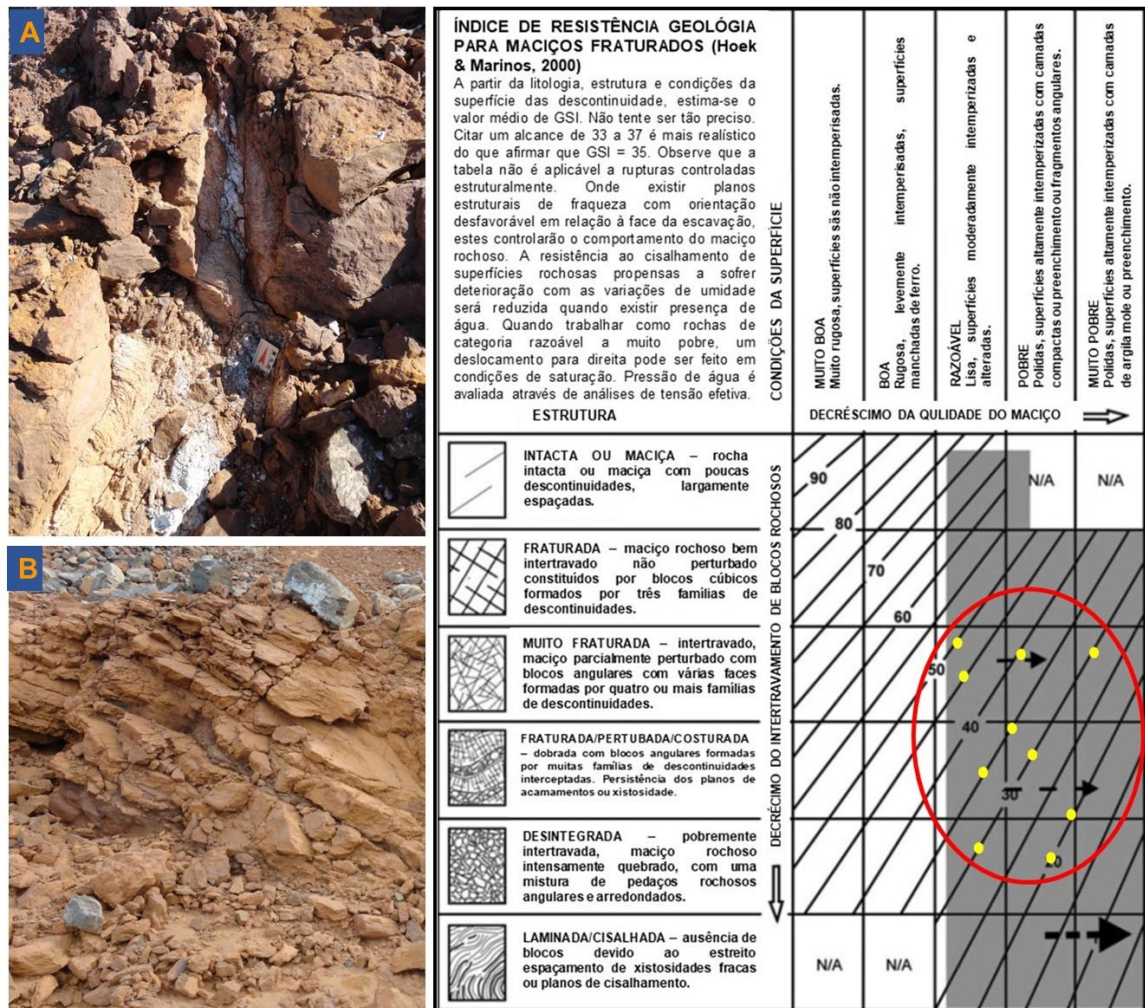


Figura 42: Descontinuidades em calcedônia e, ao lado, plotagem dos valores atribuídos para o GSI (Pontos 146 e 147).

A qualidade do maciço composto pela calcedônia *soft* (CS) é, em grande parte, influenciada pela composição de sua matriz, cujos blocos porosos que estão imersos e/ou compõem a massa do conjunto possuem granulometria variando entre 60 mm (pedregulhos) até 1 m (matacões), resistência entre R3-R5 e intemperismo entre W2-W4. Enquanto a fração fina possui resistência variando entre R0 a R1, intemperismo em torno de W5 e W6, textura areno-siltosa a silto-argilosa e baixa plasticidade. A figura 43 traz uma ideia destas características.



Figura 43: Calcedônia soft (Ponto 216).

O solo laterítico é caracterizado por textura variando entre silto-argilosa argilo-arenosa, plasticidade alternando entre média-alta, resistência R6 e intemperismo W6. Conforme pode ser visto na figura 44, o topo do perfil de alteração da área de estudo é caracterizado por uma fina camada laterítica associada à cobertura orgânica. No entanto, nos lugares onde existe maior exposição desse tipo de material, a presença de linha de seixos e blocos arredondados indica que pode ocorrer material transportado associado a esse material.



Figura 44: Cobertura orgânica com pequena fração de laterita.

Um resumo das principais características das unidades mapeadas pode ser observado na tabela 10.

Tabela 10: Principais características das unidades mapeadas.

Unidade Litológica	Grau de Resistência	Grau de Alteração	Jv	RQD	Classe RMR
Solo	R0	W6	-	-	V
Calcedônia <i>Soft</i>	R0 – R1	W5 – W6	-	-	V
Calcedônia <i>Hard</i>	R5	W2 – W3	36	0%	III
Minério Básico	R3 – R2	W4	16	60%	IV
Minério Ácido	R1	W5	-	-	V
Minério Ferruginoso	R0 – R1	W5 – W6	-	-	V
Estéril Interno	R0 – R1	W5 – W6	-	-	V
<i>Boulder</i>	R4 – R3	W2 – W3	12	74%	II – III
Dunito	R5 – R4	W1 – W2	1,9	100%	I - II

Em trabalhos anteriores, a Anglo American, juntamente com empresas parceiras, agrupou as diferentes unidades encontrados na área de estudos em “Unidades Lito-Geomecânicas”. Essa classificação levou em consideração a gênese de formação, características geomecânicas e as propriedades geotécnicas dos materiais. Nesse sentido, as diferentes unidades foram agrupadas da seguinte maneira:

- **Rocha:** engloba as unidades Dunito e *Boulder* de Dunito.

- **Saprolito de Minério:** compreende as unidades Minério Ácido e Minério Básico.
- **Saprolito de Estéril:** inclui as unidades Estéril Interno e Minério Ferruginoso.
- **Calcedônias:** incorpora as unidades Calcedônias *Hard* e *Soft*.
- **Solo residual Maduro:** composto pela unidade Solo Laterítico.

Apesar de algumas unidades agrupadas em uma mesma classe geomecânica apresentarem características geotécnicas diferentes, entendemos e respeitamos a classificação adotada nos trabalhos anteriores, resolvendo, desta maneira, adotar o mesmo padrão para elaboração do mapa geológico-geotécnico que se encontra anexo a esse trabalho (Apêndice D). Além disso, de acordo com o Aydin (2006), a aplicação rigorosa de métodos de engenharia em maciços alterados apresenta resultados pouco eficientes e que técnicas como zoneamento geológico-geotécnico demonstram melhores resultados.

4.5. Análise Cinemática

A posição espacial das feições estruturais em relação à geometria dos taludes são elementos fundamentais no estudo de potenciais situações de instabilidade que tais estruturas podem ocasionar (Charbel, 2008).

A análise cinemática simples permite avaliar a influência das feições estruturais na estabilidade de taludes, e possibilita identificar potencial de ruptura do tipo planar, cunha e tombamento (Filho, 2014). Os modelos desses tipos de rupturas estão ilustrados na figura 45.

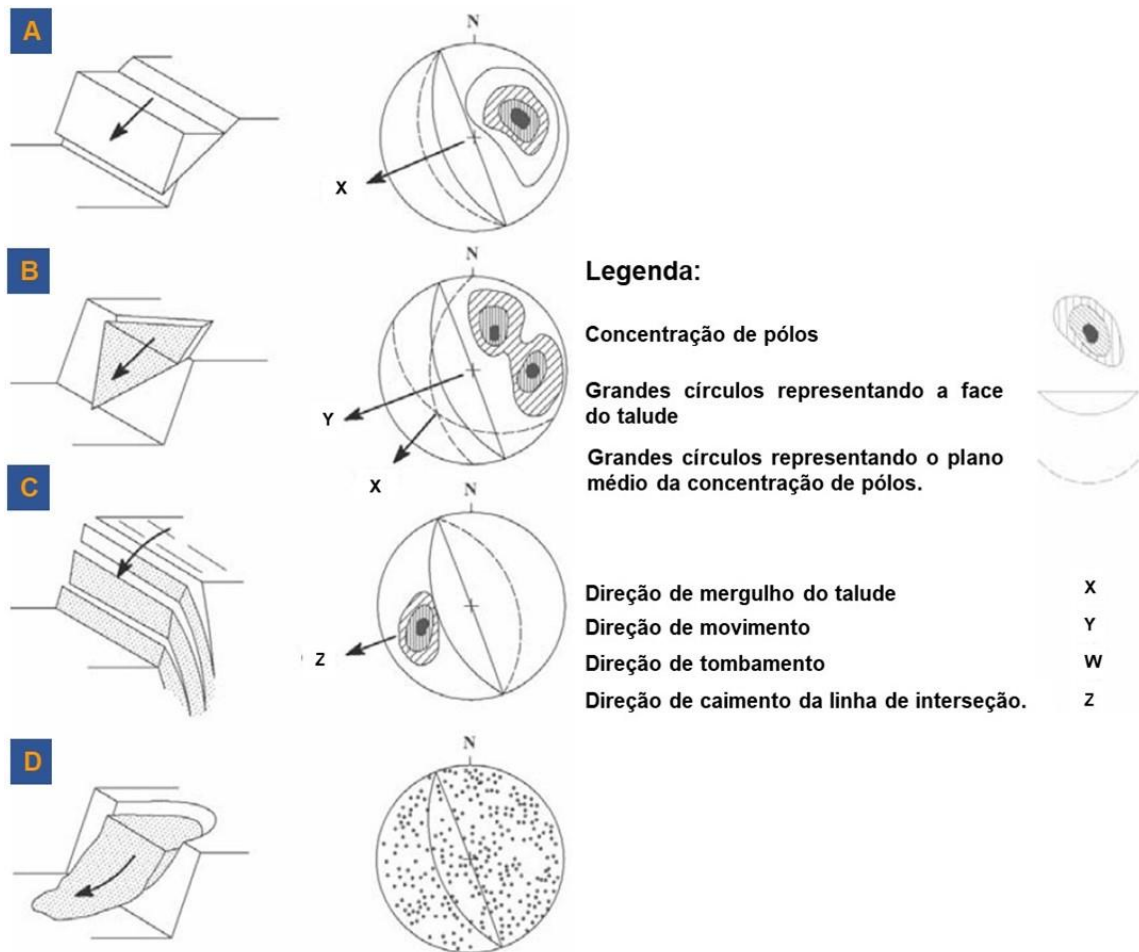


Figura 45: Ruptura do tipo planar, cunha e tombamento (Modificado de Neyra, 2006).

Na ruptura planar (figura 45-A), além do mergulho da descontinuidade ser maior que o ângulo de atrito, é preciso que o ângulo de inclinação da descontinuidade seja menor que o ângulo da face do talude. Além disso, o ângulo entre a orientação da descontinuidade e a face do talude deve ser menor ou igual a 20° (Hoek e Bray, 1977).

Com relação a ruptura em cunha (figura 45-B), ela ocorre quando duas famílias de estruturas se intersectam formando um bloco com forma geométrica idêntica a uma cunha. De acordo com Hoek e Bray (1977), nesse tipo de ruptura o ângulo de atrito das descontinuidades deve ser menor que o ângulo da linha de intersecção das famílias de descontinuidades que aflora na superfície do talude.

De acordo com o Filho (2014), nas rupturas do tipo planar e cunha a estrutura tem rumo de mergulho concordante com a face do talude. Na projeção estereográfica, esses tipos de rupturas são representados através dos polos das

descontinuidades localizadas na parte oposta do círculo maior, representado pelo plano da face do talude.

Ruptura por tombamento (figura 45-C), ocorre em maciços de boa qualidade, onde é possível a formação de estruturas colunares separadas por descontinuidades com mergulho alto e muro contrário a face do talude (Hoek e Bray, 1977). Para esse caso, os pólos das descontinuidades são plotados no mesmo lado da área de projeção esferográfica (Filho, 2014).

A ruptura circular (figura 45-D) é geralmente associada a solos e maciços rochosos muito fragmentados e/ou intemperizados, cujas rupturas não possuem controle estrutural. As rupturas desse tipo possuem geometria aproximada à um arco e determinam uma superfície de ruptura pouco profunda (Filho, 2014).

Nesse texto, a análise cinemática é bastante empregada como estudo preliminar de possíveis rupturas do tipo planar, cunha e tombamento. Em geral, neste tipo de análise são empregados conceitos de cone ou círculo de atrito e teste de Markland.

De acordo com Neyra (2006), para análise cinemática é considerado a atitude média de cada família de descontinuidades em relação a face do talude. Nesse arranjo geométrico, o desvio padrão do cone de variabilidade é calculado com base na atitude média das famílias.

Na avaliação de ruptura do tipo planar (46-a) é aplicado o conceito de envoltória de talude, levando em consideração a utilização de uma janela cinemática de 40° de abertura. No caso de rupturas do tipo em tombamento (46-b), são analisadas dentro de uma janela cinemática com abertura de 60° as famílias de descontinuidades com mergulho menor que a inclinação do talude (Neyra, 2006). Em relação a ruptura do tipo cunha (46-c), a avaliação é fundamentada nas linhas de interseção das famílias de descontinuidades e o ângulo de caimento em relação a face do talude, dentro de uma janela cinemática com 90° de abertura (Neyra, 2006).

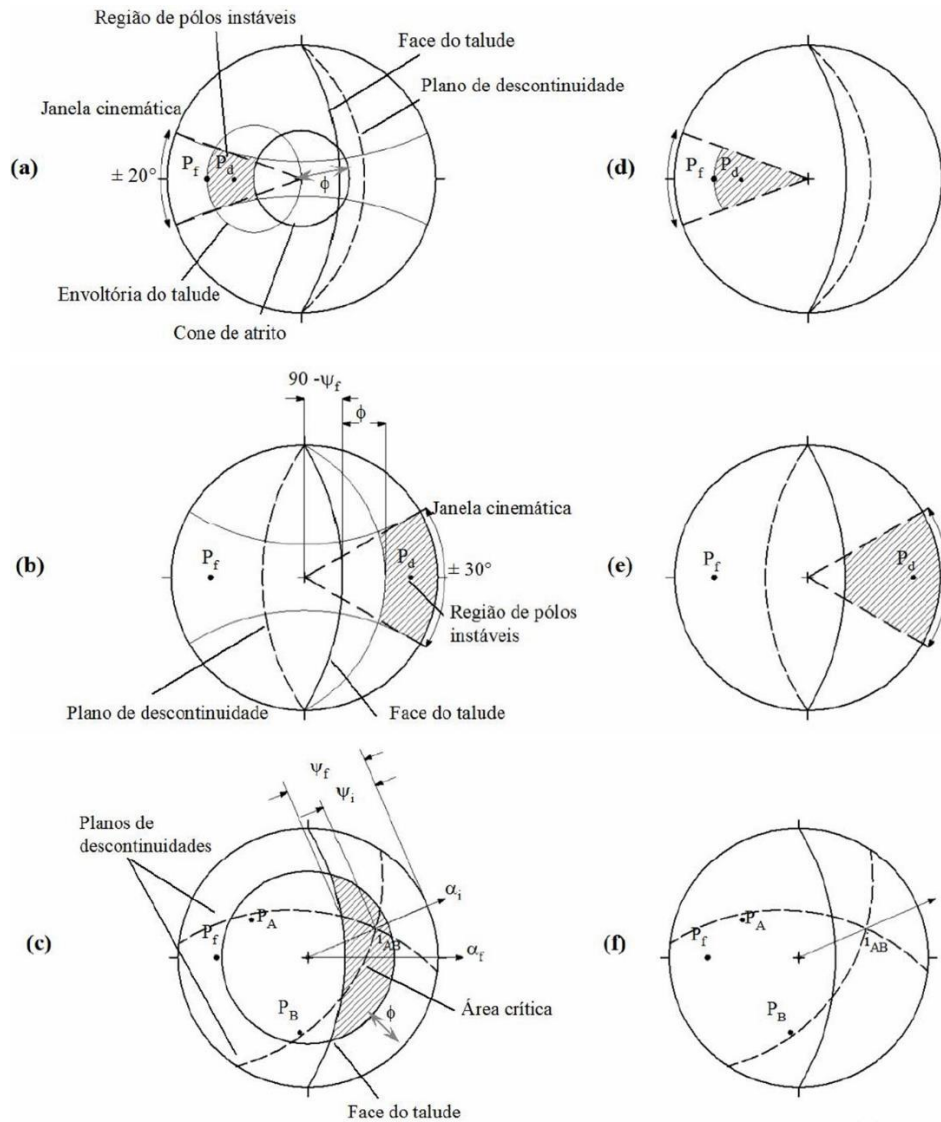


Figura 46: Critérios simplificados para a análise cinemática. a- ruptura planar, b- ruptura por tombamento, c- Ruptura em cunha (Hoek & Bray, 1977). Nos estereogramas, P = pólos dos planos; f = face do talude; ψ_f = ângulo de mergulho do talude; ψ_i = ângulo de mergulho da linha de interseção e ϕ = ângulo de atrito (Neyra, 2006).

Para esse trabalho foi realizado uma análise cinemática simples com base em todas as descontinuidades mapeadas. Para isso, foi utilizado o programa *Dips* da *Rocscience*, que é muito aplicado na análise de recursos relacionados ao comportamento de maciços rochosos.

O objetivo desta análise simplificada é verificar e/ou analisar o impacto das descontinuidades na estabilidade do maciço da área A1P4F1, buscando, desta maneira, subsídio para melhor entender as feições estruturais mapeadas.

O ângulo de atrito é um parâmetro importante na geomecânica, podendo variar de acordo com as características intrínsecas a cada tipo de rocha. Em dunitos serpentinizados, conforme Pérez-Rey et al. (2015), o ângulo de atrito básico está em torno de 34,2°. Assim, visto que não foram realizados teste para determinar esse parâmetro, optou-se por trabalhar com um fator de segurança maior, adotando, desta maneira, um ângulo de atrito de 28°.

Uma prévia dos resultados pode ser vista na figura 47 e, em melhor resolução, no apêndice A.

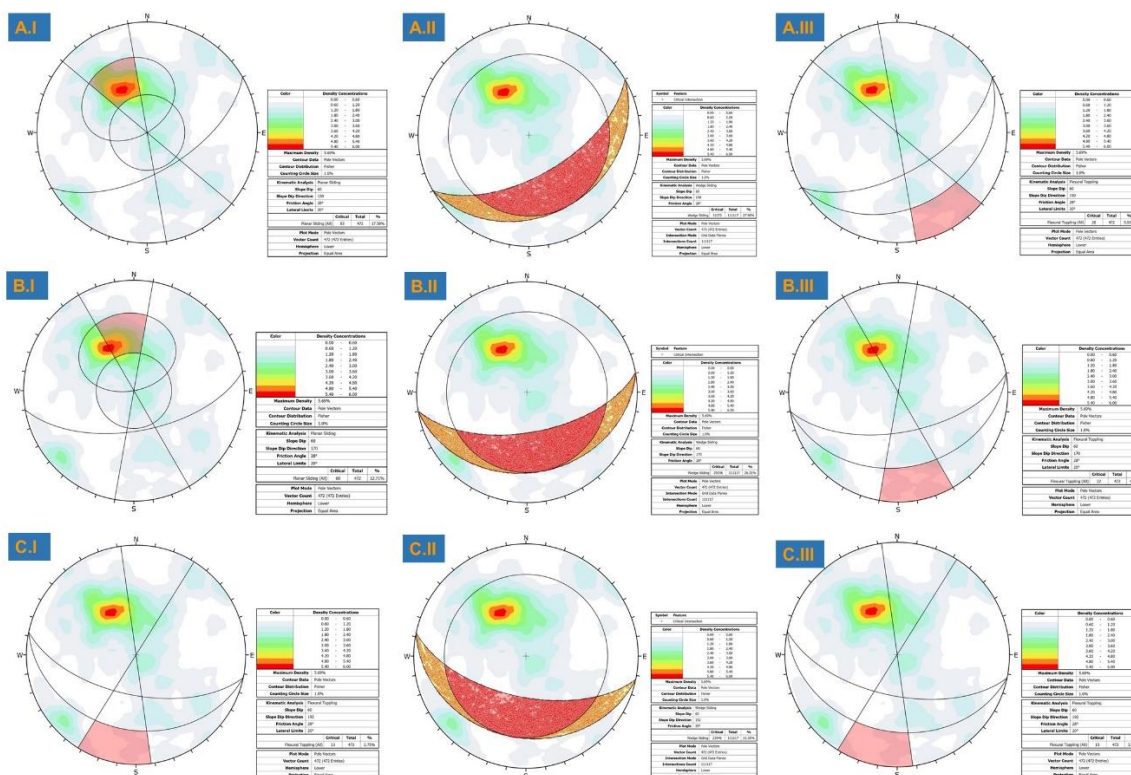


Figura 47: Análise cinemática simples. Para a face de talude, temos: A.I-III = 150/60; BI-III = 170/60; CI-III = 192/60.

Os resultados da análise cinemática com base em três geometrias diferentes podem ser vistos na tabela 11. De acordo com Admassu (2010), índices inferiores a 0,1 (10%) seriam insuficientes para possibilitarem uma ruptura.

Tabela 11: Resultados das análises para ruptura planar, cunha e tombamento.

Orientação da Face	Planar (%)	Cunha (%)	Tombamento (%)
150/60	17,58	27,96	5,93
170/60	12,71	26,31	4,66
192/60	2,75	21,55	2,75

Com base nos dados processados e obtidos, os principais tipos de rupturas com potencial de ocorrerem na área de estudos são as do tipo planar e, com maior frequência, em cunha.

5. Resultados e Discussões

Na área de estudos foram mapeados Dunito-Serpentinizado, *Boulder* de Dunito, Minério Básico, Minério Ácido, Minério Ferruginoso e Estéril Interno. Tais litologias compõem um perfil de alteração típico para rochas Máficas-Ultramáficas, e são sobrepostas por Calcedônias e Solo laterítico.

O fundo da cava é predominantemente caracterizado por dunito e *boulder*, que são caracterizados por geometria irregular e/ou arredondado concêntrico – aspecto típico de rocha heterogênea caracterizada por esfoliação esferoidal.

Na porção intermediária do perfil de intemperismo, foram mapeadas litologias associadas ao processo de enriquecimento supergênico, e variam em relação a coloração, textura e composição.

As calcedônias, juntamente com o solo laterítico e o material orgânico, recobrem todo o pacote alterado. As calcedônias não têm sua origem totalmente entendida e, com base principalmente na porosidade, são diferenciadas em calcedônia hard e soft.

As feições estruturais mapeadas não permitem propor uma divisão da cava da mina com base em domínios estruturais pois, resguardando algumas diferenças, essas estruturas apresentam o mesmo padrão de comportamento para as diferentes unidades mapeadas.

A área é caracterizada por xistosidade (S_1) subparalela ao bandamento composicional (S_0), clivagens disjuntivas espaçadas (S_2), vênulas e veios de quartzo, planos de falhas e juntas. A orientação preferencial da xistosidade (S_1) apresenta atitude preferencial com orientação N64E/38SE e a distribuição das curvas de isofrequência indicam deformação por dobramento, o qual gerou dobras assimétricas suave com plano axial orientado segundo N31E/63NW.

As duas direções preferenciais de estruturas mapeadas estão alinhadas segundo direção NW/SE e NE/SW e, em menor proporção, orientadas na direção N-S. Esse padrão de estruturas é similar àquelas observadas para os lineamentos

estruturais, delineados através de imagem de satélite e confirmados através de dados magnetométricos.

Para a cinemática e padrão de orientação dos esforços, a relação de ortogonalidade entre o sistema de fraturas NW-SE e NE-SW, e a relação destes com os planos axiais (plano ab) e planos de perfis de dobras (plano ac) são compatíveis com modelos idealizados de fraturamento associado a dobramento cilíndrico. Deste modo, as fraturas NW-SE e NE-SW, são correlacionáveis respectivamente às fraturas extensionais longitudinais (fraturas ac) e ortogonais (fraturas ab).

Alguns planos de falhas são caracterizados por duas direções de estrias associadas a *slickensides*, que ressalta possíveis mudanças na orientação dos esforços compressivos durante os eventos deformacionais rúpteis. A primeira direção está orientada segundo NW-SE e é caracterizada por cinemática de caráter reverso com transporte de topo para NW. A segunda direção de estrias (NE/SW) demonstra transporte de topo para SW, indicando um componente na cinemática reverso e sinistral.

Foram observados planos de deslizamentos orientados subparalelos ao plano de foliação, com direção estimada em N84W/40SW e, em geral, possuem dimensões variadas e estão localizadas no contato entre litologias. Algumas destas feições, refletem acomodação das camadas para os diferentes estados de saturação do maciço.

Com relação a caracterização geológica-geotécnica, a tabela 12 apresenta as principais características das diferentes unidades mapeadas. Esses valores, descrevem um maciço bastante heterogêneo e anisotrópico.

Tabela 12: Os valores para o espaçamento é a média das medidas registradas em campo. Com relação ao espaçamento, foi variação média para todas as unidades entre 0,1 a 2000 cm.

Unidades	Dunito	BDD	SPMB	SPMA	SPMF e SPE	CH	CS
R	5 - 4	4 - 3	3 - 2	1	0 - 1	5	0 - 1
W	1 - 2	2 - 3	4	5	5 - 6	2 - 3	5 - 6
Abertura (mm)	0,5-20	1- 100	0,3-50	0,2-20	5-20	0,5-50	1-50
Persistência (m)	1- 20	1-20	1-20	1-20	1-10	1-20	1-5
Espaçamento (cm)	1,5-500	0,3-700	0,5-500	0,1-200	0,5-200	1-500	0,1-200

JRC20 (mm)	1- 15	1-17	1-10	1-20	1-2	0,3-45	0,5-20
JV	1,9	12	16	-	-	36	-
RQD	100%	74%	60%	-	-	0%	-
Classe	I - II	II - III	IV	V	V	III	V

Apesar de algumas unidades agrupadas em uma mesma classe geomecânica apresentarem características geotécnicas diferentes, para o mapa geológico-geotécnico foi adotado o padrão utilizado em trabalhos anteriores. Essa decisão se apoia no fato de que, em maciços com tais características, técnicas como zoneamento geológico-geotécnico demonstram melhores resultados que aplicações rigorosas de métodos de engenharia.

No que tange a parte hídrica, foi observado uma clara influência na estabilidade do maciço, que refletem em movimentações de massa como as que ocorreram no final de 2020 e 2021, conforme relato da empresa (comunicação verbal). Essa influência pode ser confirmada através de uma simples análise do gráfico da figura 2, que aponta aumento significativo da precipitação de chuva na região associada a elevação do nível freático, exatamente no período em que foram registrados os deslizamentos.

No que tange os fatores geométricos da cava, eles estão diretamente associados a profundidade e posição relativa das feições estruturais em relação aos taludes. Esse fato, associado aos efeitos das águas superficiais e subterrâneas, podem colaborar para sua desestabilização. Vale ressaltar que, na fase final do mapeamento, foram implementadas barreira hidráulicas e adequação das drenagens superficiais da porção superior da área de estudos. Esse trabalho visa mitigar os problemas causados pelo escoamento superficial.

A análise cinemática simples e de caráter preliminar, feita em relação a três geometrias diferentes, obteve índices superiores a 0,1 (10%) para rupturas do tipo planar e cunha. A observação de movimentações que indicam rupturas passada, bem como relatos, corroboram os resultados obtidos.

6. Conclusões

As estruturas mapeadas (xistosidade, clivagens e fraturas) na área de estudos estão correlacionadas aos esforços compressivos orientados na direção

NE-SW. Essas estruturas são observadas em todas as litologias presentes na área, incluindo as calcedônias observadas no perfil laterítico da cava.

Aparentemente os esforços compressivos (NE-SW) permaneceram constante e atuantes nas rochas da área de estudos em diferentes níveis crustais. Estes esforços são registrados tanto nos eventos dúcteis (dobramentos, geração de xistosidade e clivagens) quanto nos eventos rúpteis (fraturas e plano de falhas).

As estruturas reliquiares observadas em campo exercem influência na qualidade do maciço da área de estudos. Tal fato, associado a critérios de drenagens, deve ser levado em consideração nos estudos geomecânicos e no planejamento da lavra.

A análise cinemática simples aplicada de forma preliminar, pode dar suporte ao planejamento na viabilidade geométrica da cava, aumentando o fator de segurança e contribuindo para economia da lavra. No entanto, uma análise por meio de métodos numéricos, a partir de parâmetros de resistência e deformabilidade do maciço, se faz necessária para a obtenção de resultados mais precisos.

7. Sugestões para trabalhos futuros

O padrão das feições estruturais observadas em campo pode estar associado a outros modelos estruturais. Nesse sentido, uma maneira de validar o modelo estrutural aplicado para área A1P4F1 é através de estudos complementares e da comparação deste com o padrão estrutural de outras frentes de lavra e/ou cavas.

Atualmente, uma parte considerável dos problemas geotécnicos estão associados ao minério ácido. Esse material é caracterizado por uma textura untuosa marcante e, em alguns casos, bastante friável. Estudos complementares envolvendo ensaios simples, como por exemplo, MCT (Miniatura, Compactada, Tropical) e adsorção de azul de metileno podem ser aplicados para melhor entendimento do comportamento desse tipo de material.

Algumas ideias defendem que a existência e, principalmente, a quantidade de calcedônias do Complexo Barro Alto está correlacionada à remobilização de uma grande concentração de sílica proveniente de unidades litoestratigráficas regionais ricas nesse componente, como a sequência vulcano-sedimentar Juscelândia. No entanto, a origem, formação e comportamento das calcedônias ainda carecem de estudos complementares.

8. Referências bibliográficas

Admassu, Y., (2010). Developing design methodology for cut slopes in Ohio. Kent State University.

ANGLO AMERICAN. Site Corporativo. Disponível em: <https://brasil.angloamerican.com/pt-pt>. Acessado em: 15/11/2021.

Almeida, F.F.M., (1981). O Craton do Paramirim e suas relações com o do São Francisco. Salvador, 1979, Simpósio sobre o Craton do São Francisco e suas faixas marginais, Sociedade Brasileira de Geologia, p. 1-10.

Almeida, F.F.M., Hasui, Y., Neves, B. B. B., Fuck, R. A., (1977). Províncias Estruturais Brasileiras, VIII Simpósio de Geologia do Nordeste, Campina Grande, Novembro 1977, N° 6, p. 363-391.

Araújo, V. A., Alves, A. C., (1979). Projeto Canabrava-Porto Real. Relatório Final, Vol.1 e 2. Convênio DNPM/CPRM, 88 p.

Aydin, A., (2006). Stability of saprolitic slopes: nature and role of field scale heterogeneities. In: Natural Hazards and Earth System Sciences, 6, p. 89-96.

Aydin, A., Duzgoren-Aydin, N. S., Malpas, J., (2000). A review of igneous and metamorphic saprolites, Journal of Nepal Geological Society, 22, pp. 11–16.

Barton, N., (1973). Review of a new shear strength criterion for rock joints, Engineering Geology, Elsevier, Amsterdam, Vol. 7, Also NGI Publ. 105, 1974, pp. 287-332.

Barton, N., (2021). Details related to the ten JRC profiles and further work. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/354657828>. Acessado em 23 de agosto de 2022.

Barton, N., Bandis, S., (1982). Effects of Block Size on the Shear Behaviour of Jointed Rock. Issues in Rock Mechanics. In Proceedings of 23 rd US Symposium of Rock Mechanics (eds RE Goodman & F.E. Heuze), Berkeley, California, AIME, New York, pp 739-760.

Barton, N., Choubey, V., (1977). The Shear Strength of Rock Rocks in Theory and Practise. Springer-Verlag, New York, 54 p.

Bieniawski, Z. T., (1989). Engineering rock mass classifications. A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil and Petroleum Engineering. John Wiley & Sons, 251 p.

Bloom, A. L., (1970). Superfície da Terra: São Paulo, Editora Edgard Blucher Ltda, 184 p.

Brasil. INMET. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>. Acessado em 25 de Agosto de 2022.

Brasil, (1981). Ministério das Minas e Energia. Secretaria-Geral. Projeto RADAMBRASIL. Folha SD.22 Goiás; geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. 639 p.

Campanha, G. A. C., Quintanilha, J. A., (1996). Análise Estatística de Dados Estruturais; Estatística de Dados Direcionais Tridimensionais, In: Carneiro, Celso Dal Re (editor) Projeção estereográfica para análise de estruturas, UNICAMP / CPRM / IPT, São Paulo, pp. 51 - 58.

Charbel, P. A., (2008). Estabilidade de Taludes de Mina. Notas de Aula. Curso Técnico em Mineração. Goiânia. CEFET/GO.

Cowland, J. W., Carbray, A. M., (1988). Three cut slope failures on relict discontinuities in saprolitic soils, Proc. 2nd Int. Conf. on Geomechanics in Tropical Soils, 1, pp. 253–258.

Correia, C. T.; Jost, H; Tassinari, C. C. G., Girardi, V. A. V., Kinny, P., (1999). Ectasian Mesoproterozoic U-Pb ages (SHRIMP-II) for the metavolcanosedimentary Sequences of Juscelândia and Indainópolis and for High-Grade Metamorphosed Rocks of Barro Alto Stratiform

Igneous Complex, Goiás State, Central Brazil. In: SAAGI- South American Symposium on Isotopic Geology, v.2. Actas SEGEMAR, Córdoba, 31-33p.

Davis G. H. and Reynolds S. J., (1996). Structural Geology of Rocks and Regions, John Wiley and Sons, New York, 753 p.

Deere, D. U., Hendron, J. R., Patton, F. D., Cording, E. J., (1967). Design of surface and near surface construction in rock. In failure and breakage of rock. C. Fairhurst ed. Society of Mining Engineers of AIME, New York, pp. 237-302.

Fernandes, G., (2000). Caracterização geológico - geotécnica e propostas de estabilização da encosta do Morro do Curral – Centro de Artes e Convenções de Ouro Preto [Dissertação]: Ouro Preto, Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Departamento de Engenharia Civil.

Fernandes, N. A., Olivo, G. R., Layton-Matthews, D., Voinot, A., Chipley, D., Diniz-Oliveira, G., (2019). Geochemistry and provenance of siliciclastic rocks from the Mesoproterozoic Upper Vazante Sequence, Brazil: Insights on the evolution of the southwestern margin of the São Francisco Craton and the Columbia Supercontinent, Precambrian Research, doi: <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.105483>.

Filho, C. F. F., Kamo, S. L., Fuck, R. A., Krogh, T. E., Naldrett, A. J., (1994). Zircon and rutile UPb geochronology of the Niquelândia layered mafic and ultramafic intrusion, Brazil: constraints for the timing of magmatism and high grade metamorphism. Prec.Research, 68, pp. 241-255.

Filho, C. F. F., Nilson, A. A., Naldret, A. J. (1992). The Niquelandia mafic-ultramafic Complex, Goiás, Brazil: a contribution to the ophiolite x stratiform controversy based on new geological and structural data. Precamb. Res.59, pp. 125-143.

Filho, C.F.F (1999). Geologia do segmento N-S do Complexo de Barro Alto, Goiás. In: Simpósio Regional de Geologia do Centro-Oeste,7, e Simpósio de Geologia de Minas Gerais, 10, Brasília, SBG. Res. pp. 7-7.

Filho, C. F. F., Pimentel, M. M., Araújo, S. M., Laux, J. H., (2010). Layered intrusions and volcanic sequences in Central Brazil: Geological and geochronological constraints for Mesoproterozoic (1.25 Ga) and Neoproterozoic (0.79 Ga) igneous associations. In: Precambrian Research 183, p. 617-634, doi 10.1016/j.precamres.2010.06.008.

Filho, C. L. M., Nummer, A. V., (2014). Introdução à Geologia de Engenharia. 5ª Edição - Revista e Ampliada. Editora UFSM, 296 p.

Filho, R. W., Teixeira, N. A., (1981). Sequência vulcano- sedimentar da borda oeste dos complexos de Niquelândia e Canabrava. Sociedade Brasileira de Geologia, Núcleo Centro-Oeste, Bol.Inf. 10, Goiânia, pp. 157-177.

Fluty, M. J., 1964, The description of folds. London: Proceedings of the Geologists` Association 75, pp. 461 - 492.

Fossen, H., (2017). Geologia estrutural / Haakon Fossen; Tradução Fábio R.D de andrade. -- 2. ed. atual. e ampl. -- São Paulo: Oficina de Textos, 606 p.

Fuck, R. A., (1994). A Faixa Brasília e a compartimentação tectônica na Província do Tocantins. In: IV Simpósio de Geologia do Centro-Oeste, p. 184-187.

Fuck, R. A., Danni, J. C. M., Winge, M., Andrade, G. F., Barreira, C. F., Leonardos, O. H., Kuyumjia, N, R. M., (1981). Geologia da Região de Goianésia. In: Simpósio de Geologia do Centro Oeste, Goiânia – SBG, pp 447-467.

Girardi, V.A.V., Riivalenti, G., Sinigoi, S., (1986). The petrogenesis of the Niquelandia layered basic-ultrabasic Complex, Central Goiás, Brazil. Journal of Petrology, v. 27, 715-744.

- Giani, G. P. (1992). Rock slope stability analysis. A.A. Balkema Publishers, Rotterdam, 345 p.
- Guidicini, G., Nieble, C. M., (1984). Estabilidade de taludes naturais e de escavação. 2a.edição. Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 195 p.
- Hasuy, Y., Mioto, J. A., (1988). A zona sismogênica de Porangatu. Congresso Brasileiro de Geologia, 35, Anais, Belém-PA, v.5, pp. 2173-2186.
- Hobbs, B.E.; Means, W.D.; Williams, P.F. (1976) An outline of Structural Geology. John Wiley & Sons. 571p.
- Hoek, E., (1994). Strength of rock and rock masses. ISRM New Journal 2(2), pp. 4-16.
- Hoek, E., Bray, J., (1977). Rock slope Engineering. The institution of mining and metallurgy, London, 358 p.
- Hoek, E, Brown, E. T., (1997). Practical estimates of rock mass strength. Int. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Elsevier, vol. 34, nº 8, pp. 1165–186.
- Hudson, J. A., Harrison, J. P., (1997). Engineering rock Mechanics: An introduction to the principles. Published by Elsevier Science Ltd., 444 p.
- ISRM (1978). Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. Int. J. Rock Mechanics Min. Sci. Geomech. abstr., 15, pp. 319-368.
- ISRM (1981). Basic geotechnical description of rock masses. Int. Society of Rock Mechanics, Commission on the classification of rocks and rock masses. Int. J. Rock Mechanics Min. Sci. Geomech. abstr., 18, pp. 85-110.
- Júnior, J.D.A.B., (1982). Os Principais Depósitos Mineraiis da Região Centro-Oeste. – Brasília: DNPM, 255 p.
- Júnior, J.D.A.B., (1986). Ferro e metais da indústria do aço. In: Schobbenhaus Filho, C.& Coelho, C.E.S. eds. Principais Depósitos Mineraiis do Brasil. Brasília. DNPM/Cia Vale do Rio Doce. Vol. II. p.315-323.
- Lima, T. M., (2010). Síntese geológica e prospecção geoquímica da área Barro Alto, Goiás. Informe de Recursos Mineraiis. Série Metais do Grupo da Platina e Associados, nº 30. Goiânia, CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 58 p.
- Lisle, J. R., Leyshon, P. R., (2004). Stereographic projection Techniques for geologist and civil engineers. Cambridge University Press, 112 p.
- Lindquist, E. S., (1994). The Strength and Deformation Properties of Melange [Dissertação]: University of California at Berkeley.
- Marinos, V., Marinos, P., Hoek, E., (2005). The geological strength index: applications and limitations. Original Paper, pp. 55-65, doi 10.1007/s10064-004-0270-5
- Massad, F., Teixeira, H. R., (1985). Deep cut on saprolitic soils conditioned by relict structures, Proc. 1st Int. Conf. on Tropical Lateritic and Saprolitic Soils, 2, pp. 381–391.
- McClay, K., (1987). The Mapping of Geological Structures. Wiley & Sons, 163 p.
- Nascimento, M. A. L. S., (1992). Geomorfologia do Estado de Goiás. Boletim Goiano de Geografia. UFG, v. 12, nº 1. Goiânia, 22 p.

Navarro, G. R. B., (2006). Geologia da Região de Pontalina (GO) [Tese de Doutorado]: Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas.

Neyra, A. F. M., (2006). Caracterização das estruturas geológicas e estimativas da resistência ao cisalhamento das descontinuidades na mineração de cobre de Tintaya, Peru [Dissertação de Mestrado]: Brasília, Universidade de Brasília, Instituto de Geociências.

Nimer, E., (1972). Ensaio de um novo método de classificação climática: contribuição à climatologia intertropical e subtropical, especialmente do Brasil. Boletim de Geografia. Rio de Janeiro, v. 31, n.277, pp.141-153.

Passchier, C.W. & Trouw, R.A.J. (2005). *Microtectonics*. Springer. 366p

Palmstrom, A., (1982). The volumetric joint count – a useful and simple measure of the degree of rock mass jointing. In: IV Congress International Association of Engineering Geology Volume 2, pp. 221-228.

Pérez-Rey, I., González J., Arzúa J., Alejano L., (2015). Effect of time and wear on the basic friction angle of rock discontinuities. Researchgate, Salzburg, Austria, pp. 1115-1120.

Pimentel, M. M., Fuck, R. A., Jost, H., Filho, C. F. F., Araújo, S. M., (2000). The Basement of the Brasília Fold Belt and the Goiás Magmatic Arc. In: *Tectonic Evolution of South America*, Rio de Janeiro, p. 195-229.

Ramsay, J. G., (1967). *Folding and Fracturing of rocks*. McGraw-Hill, New York, 568 p.

Ramsay, J.G. & Huber, M.I. (1984) *The Techniques of Modern Structural Geology: strain analysis*. Academic Press. 307 p.

Ramsay, J.G. & Huber, M.I. (1987) *The Techniques of Modern Structural Geology: folds and fractures*. Academic Press. 391 p.

Ritter, W., (1879). *Die Statik der Tunnelgewölbe*. Berlin: Springer.

Rowland, S. M., Duebendorfer, E., Schiefelbein, I., (2006). *Structural Analysis and Synthesis*. 3rd Edition, Blackwell Scientific Publications, 320 p.

St. John, B. J., Sowers, G. F., Weavers, C. H. E., (-1969). Slickensides in residual soils and their engineering significance, Proc. 7th Int. Conf. on SMFE, II, pp. 591–597.

Trecases et al. (1981). A Jazida de Níquel de Barro Alto. 1º Simpósio de Geologia do Centro-Oeste – Goiânia, 778 p.

Ulusay, R., (2015). *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007–2014*. Springer International Publishing Switzerland, doi 10.1007/978-3-319-07713-0.

Van Der Pluijm, B.A. and Marshak, S. (2004) *Earth Structure: An Introduction to Structural Geology and Tectonics*. 2nd Edition, WW Norton, New York, pp. 656

Vargas, M., Pichler, E., (1957). Residual soil and rock slides in Santos (Brazil), Proc. 4th Pan-American Conf on SMFE, 6/27, pp. 394–398.

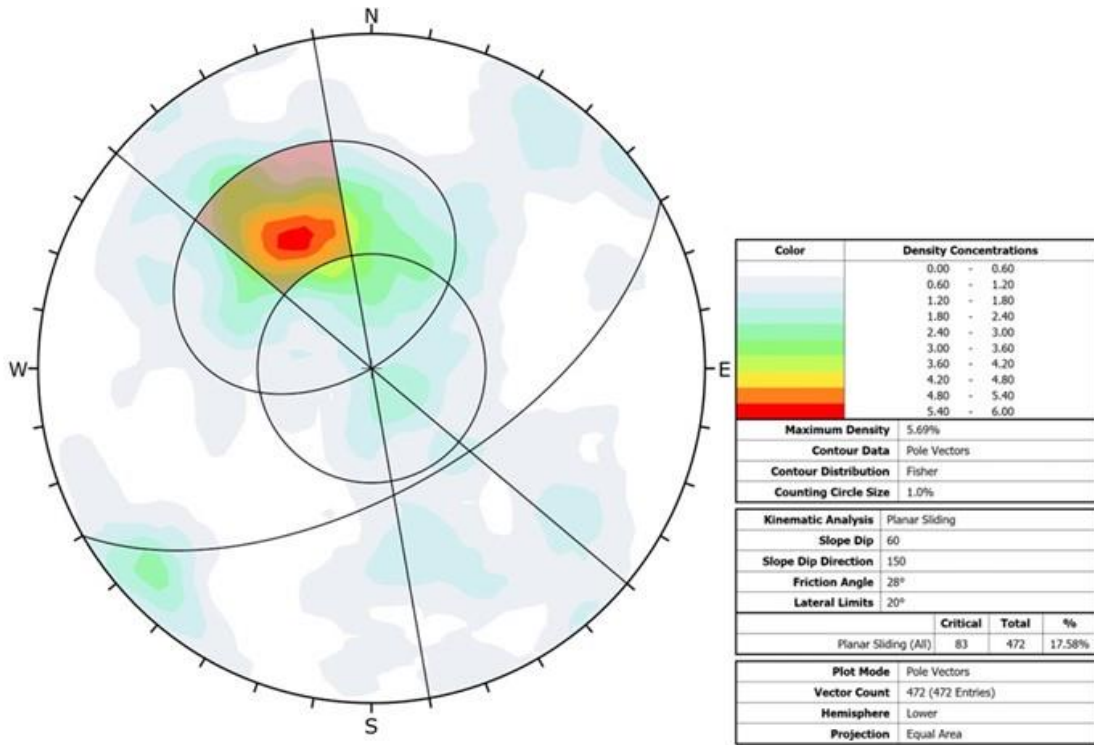
Wen, B. P., Aydin, A., (2003). Microstructural study of a natural slip zone, quantification and deformation history, *Engineering Geology*, 68, pp. 289–317.

West, L. J., Hencher, S. R., Cousins, T. W., (1991). Assessing the stability of slopes in heterogeneous soils, Proc. 6th Int. Symp. On Landslides, pp. 591–595.

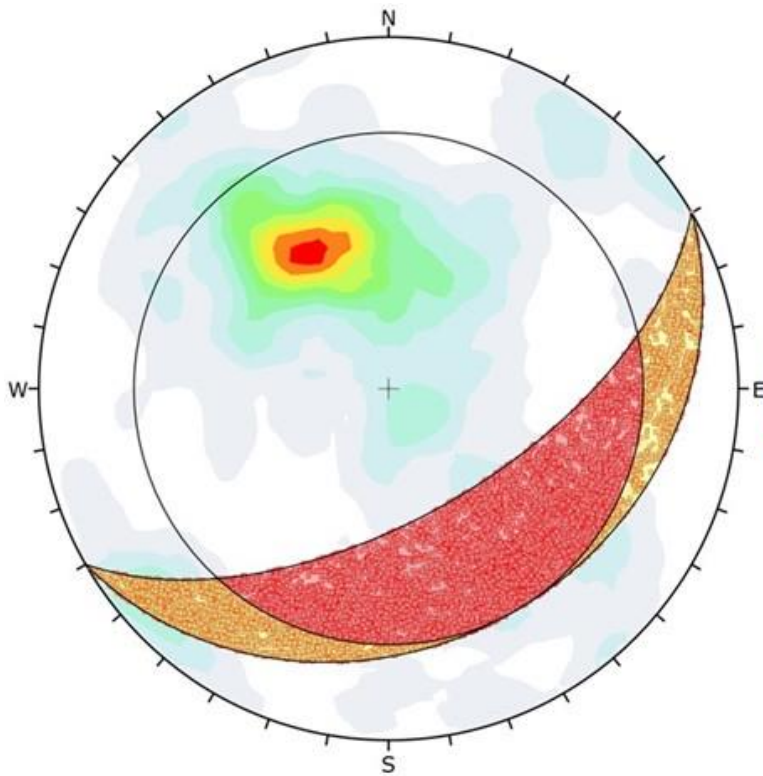
Woodcock, N. H., (1977). Specification of fabrics shapes using na eigenvalue method. Geological Society of America Bulletin. 88, pp. 1231-1236.

Apêndice A – Análise Cinemática

A1: Planar - Atitude 150/60



A2: Cunha: 150/60



Symbol	Feature
•	Critical Intersection

Color	Density Concentrations
Light Blue	0.00 - 0.60
Light Green	0.60 - 1.20
Green	1.20 - 1.80
Yellow-Green	1.80 - 2.40
Yellow	2.40 - 3.00
Orange	3.00 - 3.60
Red-Orange	3.60 - 4.20
Red	4.20 - 4.80
Dark Red	4.80 - 5.40
Dark Red	5.40 - 6.00

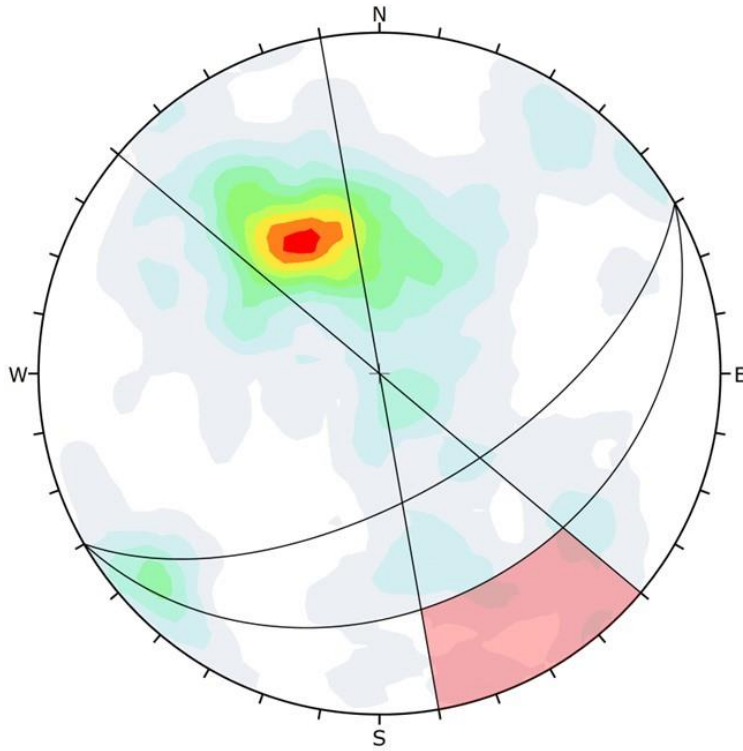
Maximum Density	5.69%
Contour Data	Pole Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis		Wedge Sliding
Slope Dip	60	
Slope Dip Direction	150	
Friction Angle	28°	

	Critical	Total	%
Wedge Sliding	31072	111117	27.96%

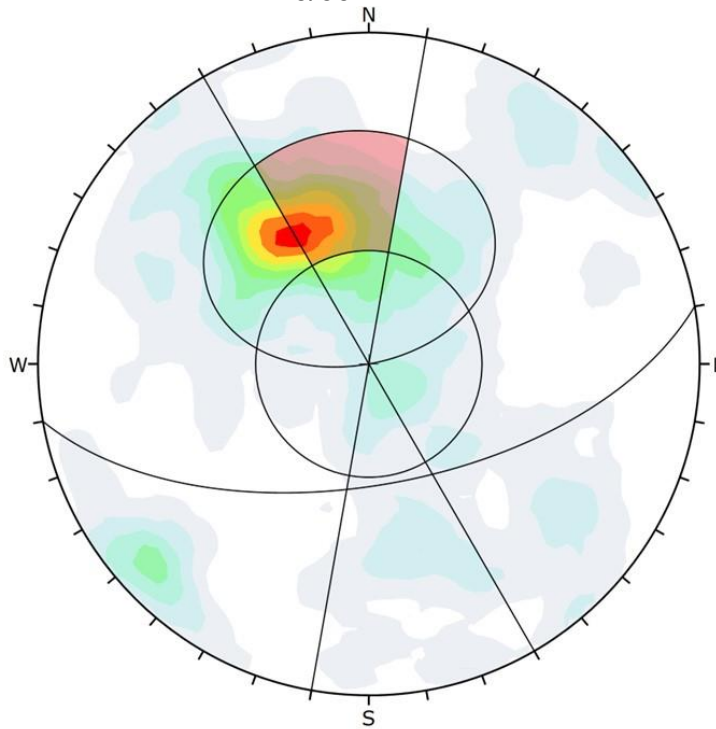
Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	472 (472 Entries)
Intersection Mode	Grid Data Planes
Intersections Count	111117
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

A3: Tombamento - Atitude 150/60



Color	Density Concentrations		
	0.00 - 0.60		
	0.60 - 1.20		
	1.20 - 1.80		
	1.80 - 2.40		
	2.40 - 3.00		
	3.00 - 3.60		
	3.60 - 4.20		
	4.20 - 4.80		
	4.80 - 5.40		
	5.40 - 6.00		
Maximum Density	5.69%		
Contour Data	Pole Vectors		
Contour Distribution	Fisher		
Counting Circle Size	1.0%		
Kinematic Analysis	Flexural Toppling		
Slope Dip	60		
Slope Dip Direction	150		
Friction Angle	28°		
Lateral Limits	20°		
	Critical	Total	%
Flexural Toppling (All)	28	472	5.93%
Plot Mode	Pole Vectors		
Vector Count	472 (472 Entries)		
Hemisphere	Lower		
Projection	Equal Area		

A4: Planar - Atitude 170/60



Color	Density Concentrations
	0.00 - 0.60
	0.60 - 1.20
	1.20 - 1.80
	1.80 - 2.40
	2.40 - 3.00
	3.00 - 3.60
	3.60 - 4.20
	4.20 - 4.80
	4.80 - 5.40
	5.40 - 6.00

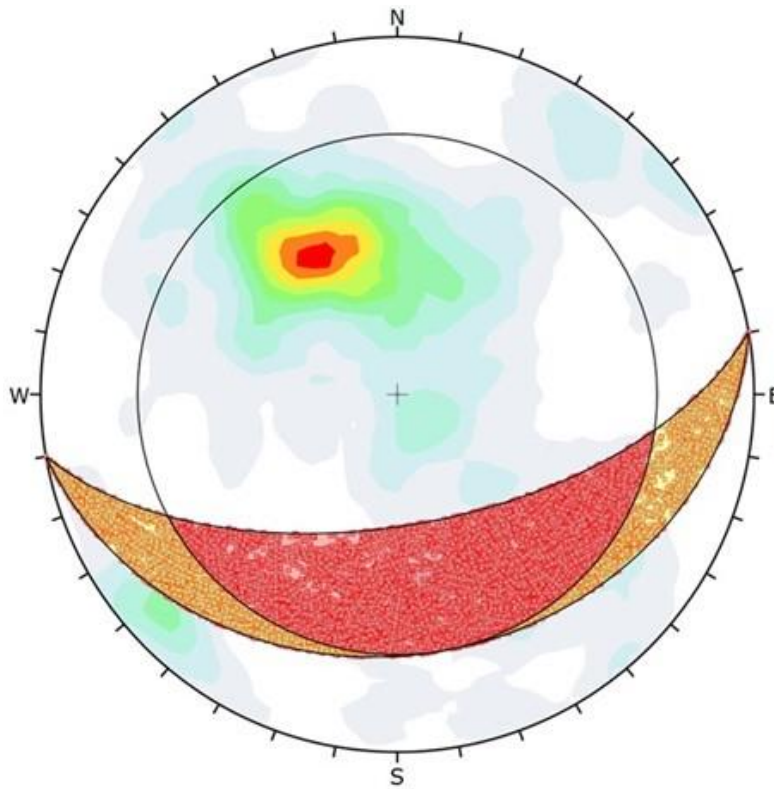
Maximum Density	5.69%
Contour Data	Pole Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Planar Sliding
Slope Dip	60
Slope Dip Direction	170
Friction Angle	28°
Lateral Limits	20°

	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	60	472	12.71%

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	472 (472 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

A5: Cunha - Atitude 170/60



Symbol	Feature
*	Critical Intersection

Color	Density Concentrations
	0.00 - 0.60
	0.60 - 1.20
	1.20 - 1.80
	1.80 - 2.40
	2.40 - 3.00
	3.00 - 3.60
	3.60 - 4.20
	4.20 - 4.80
	4.80 - 5.40
	5.40 - 6.00

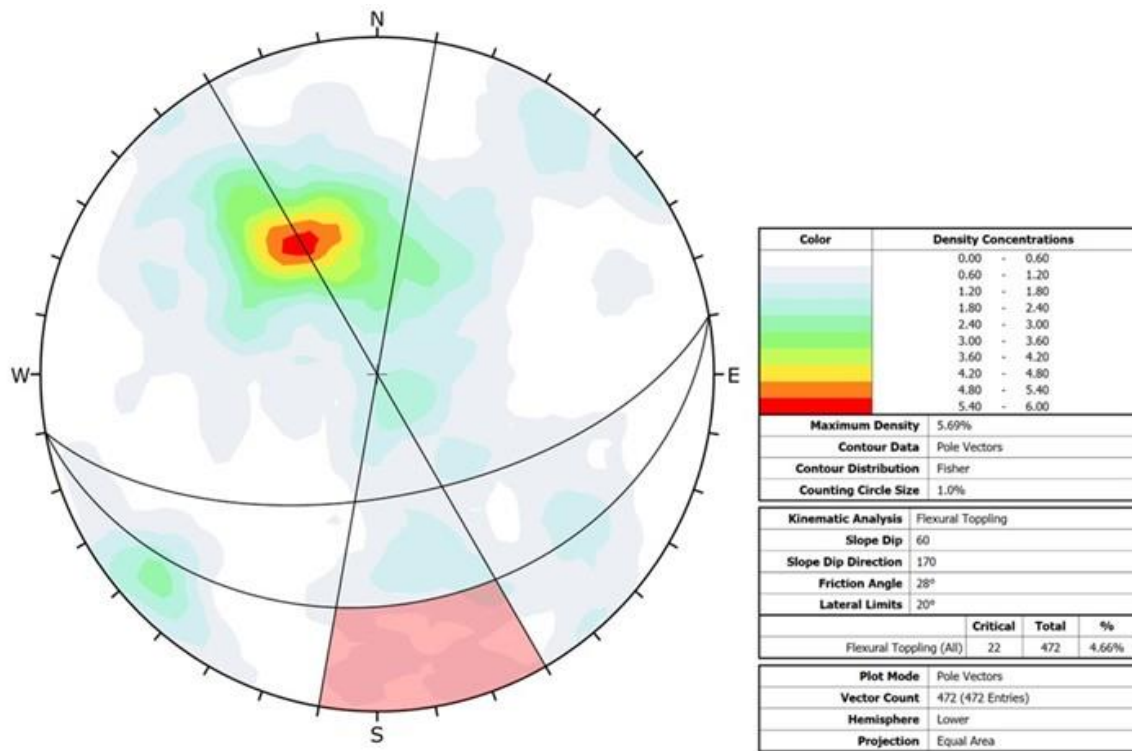
Maximum Density	5.69%
Contour Data	Pole Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Wedge Sliding
Slope Dip	60
Slope Dip Direction	170
Friction Angle	28°

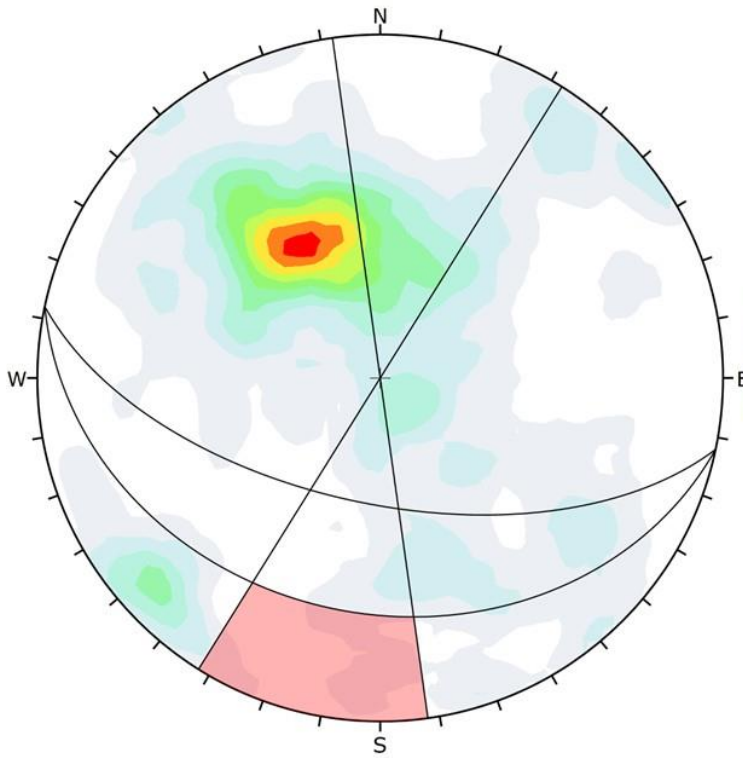
	Critical	Total	%
Wedge Sliding	29236	111117	26.31%

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	472 (472 Entries)
Intersection Mode	Grid Data Planes
Intersections Count	111117
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

A6: Tombamento - Atitude 170/60

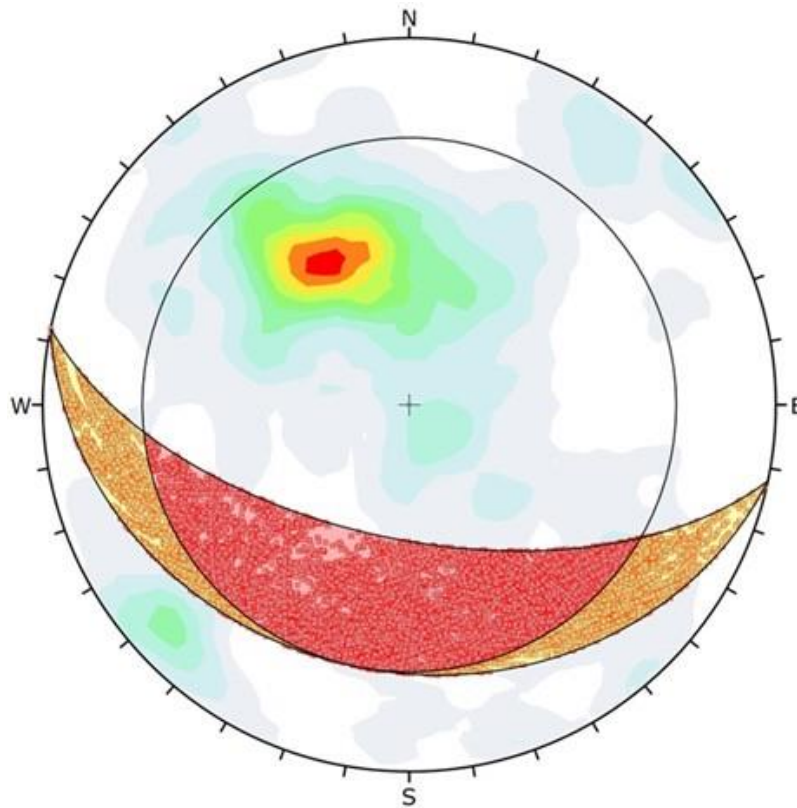


A7: Tombamento - Atitude 192/60



Color	Density Concentrations		
	0.00 - 0.60		
	0.60 - 1.20		
	1.20 - 1.80		
	1.80 - 2.40		
	2.40 - 3.00		
	3.00 - 3.60		
	3.60 - 4.20		
	4.20 - 4.80		
	4.80 - 5.40		
	5.40 - 6.00		
Maximum Density	5.69%		
Contour Data	Pole Vectors		
Contour Distribution	Fisher		
Counting Circle Size	1.0%		
Kinematic Analysis	Flexural Toppling		
Slope Dip	60		
Slope Dip Direction	192		
Friction Angle	28°		
Lateral Limits	20°		
	Critical	Total	%
Flexural Toppling (All)	13	472	2.75%
Plot Mode	Pole Vectors		
Vector Count	472 (472 Entries)		
Hemisphere	Lower		
Projection	Equal Area		

A8: Cunha - Atitude 192/60



Symbol	Feature
*	Critical Intersection

Color	Density Concentrations
	0.00 - 0.60
	0.60 - 1.20
	1.20 - 1.80
	1.80 - 2.40
	2.40 - 3.00
	3.00 - 3.60
	3.60 - 4.20
	4.20 - 4.80
	4.80 - 5.40
	5.40 - 6.00

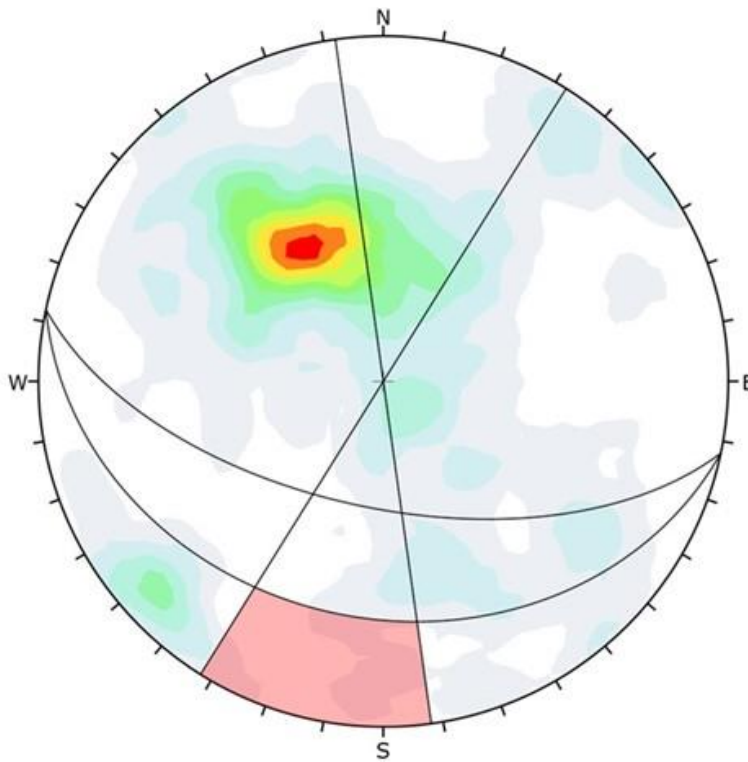
Maximum Density	5.69%
Contour Data	Pole Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	
Slope Dip	Wedge Sliding
Slope Dip Direction	60
Friction Angle	192
	28°

	Critical	Total	%
Wedge Sliding	23946	111117	21.55%

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	472 (472 Entries)
Intersection Mode	Grid Data Planes
Intersections Count	111117
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

A9: Tombamento - Atitude 192/60



Color	Density Concentrations		
	0.00 - 0.60		
	0.60 - 1.20		
	1.20 - 1.80		
	1.80 - 2.40		
	2.40 - 3.00		
	3.00 - 3.60		
	3.60 - 4.20		
	4.20 - 4.80		
	4.80 - 5.40		
	5.40 - 6.00		
Maximum Density	5.69%		
Contour Data	Pole Vectors		
Contour Distribution	Fisher		
Counting Circle Size	1.0%		
Kinematic Analysis	Flexural Toppling		
Slope Dip	60		
Slope Dip Direction	192		
Friction Angle	28°		
Lateral Limits	20°		
	Critical	Total	%
Flexural Toppling (All)	13	472	2.75%
Plot Mode	Pole Vectors		
Vector Count	472 (472 Entries)		
Hemisphere	Lower		
Projection	Equal Area		



Apêndice B – Tabelas

Tabela B-1:

Comprimento da descontinuidade (persistência)	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m
Peso	6	4	2	1	0
Separação (abertura)	Nenhuma	<0,1 mm	0,1 – 1,0 mm	1 – 5 mm	>5 mm
Peso	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito rugoso	Rugoso	Ligeiramente rugosa	Quase liso	Liso
Peso	6	5	3	1	0
Preenchimento	Nenhum	Duro com espessura < 5 mm	Duro com espessura > 5 mm	Mole com espessura < 5 mm	Mole com espessura > 5 mm
Peso	6	4	2	2	0
Grau de alteração	Não alteradas	Ligeiramente alteradas	Moderadamente alteradas	Muito alteradas	Em decomposição
Peso	6	5	3	1	0

Fonte: Adaptado de Bieniawski (1989)

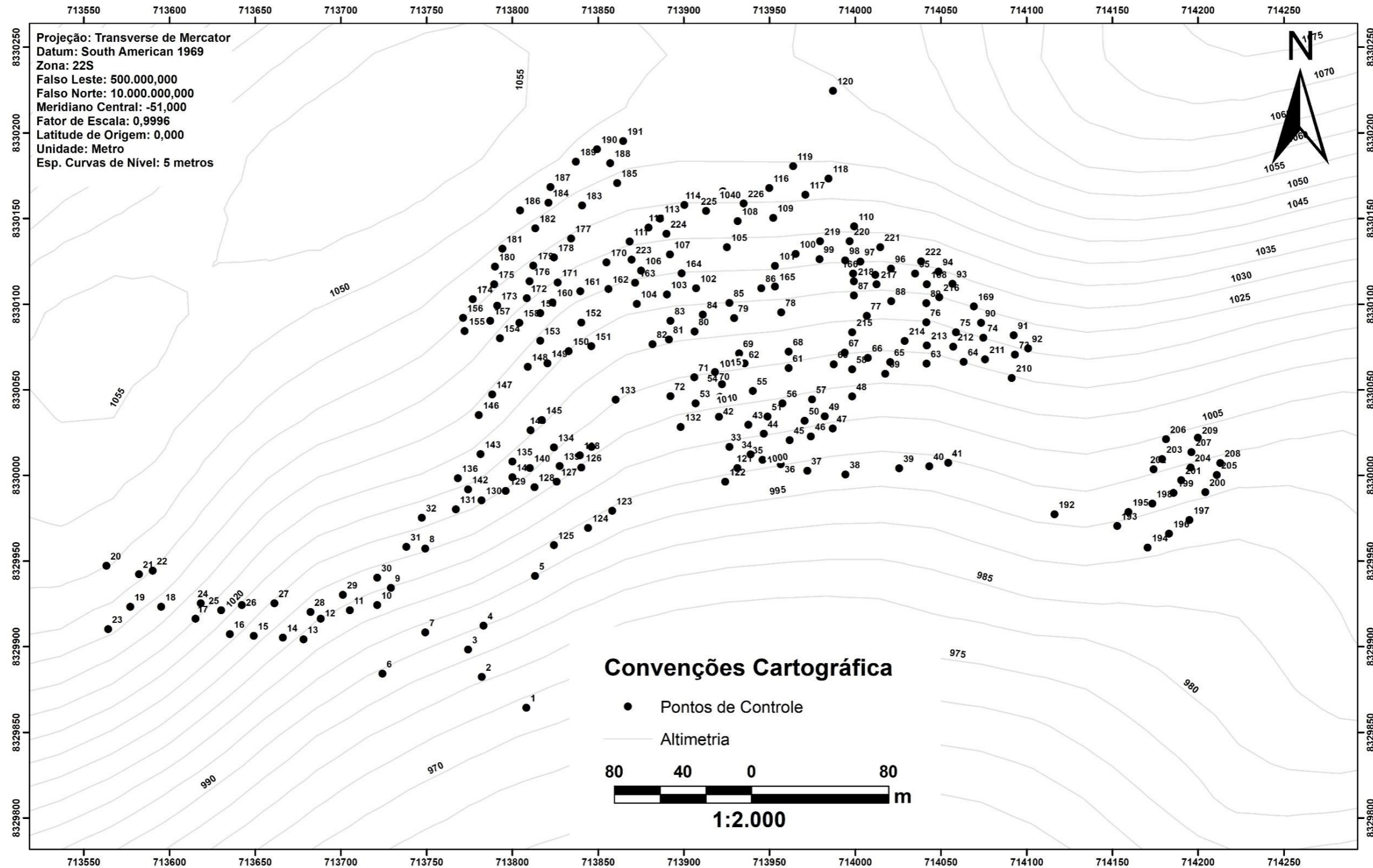
Tabela B-2: Parâmetros de classificação e seus valores

Parâmetro			Pontuação						
1	Resistência da Rocha Intacta	Resistência a compressão puntiforme (PLT) (MPa)	>10	4 - 10	2 - 4	1 - 2	Para esta faixa de valores, é preferível usar o UCS		
		Resistência à compressão uniaxial (MPa)	> 250	100 – 250	50 - 100	25 - 50	5 - 25	1 - 5	< 1
	Pontuação	15	12	7	4	2	1	0	
2	Drill core quality – RQD (%)		90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	< 25		
	Pontuação		20	17	13	8	3		
3	Espaçamento das descontinuidades		> 200 cm	60 cm – 200 cm	20 cm – 60 cm	6 cm – 20 cm	< 6 cm		
	Pontuação		20	15	10	8	5		
4	Condição das descontinuidades		Superfícies muito ásperas, não contínuas, sem abertura, paredes sem alteração.	Superfícies levemente ásperas, abertura < 1mm, paredes levemente alteradas	Superfícies levemente ásperas, abertura < 1mm, paredes intensamente alteradas	Polida com estrias ou preenchimento < 5 mm de espessura ou abertura das descontinuidades de 1 a 5mm, contínuas	Preenchimento mole > 5 mm de espessura ou abertura das descontinuidades > 5 mm, contínuas		
	Pontuação		30	25	20	10	0		
5	Águas Subterrâneas	Fluxo em 10m de comprimento de túnel (L/min)	Nulo	< 10	10 – 25	25 - 125	> 125		
		Pressão de água nas descontinuidades/ Tensão principal maior)	0	< 0.1	0.1 – 0.2	0.2 – 0.5	> 0.5		
		Condições Gerais	Completamente seco	Úmido	Molhado	Gotejando	Fluxo		
	Pontuação		15	10	7	4	0		

Fonte: Adaptado de Bieniawski (1989)

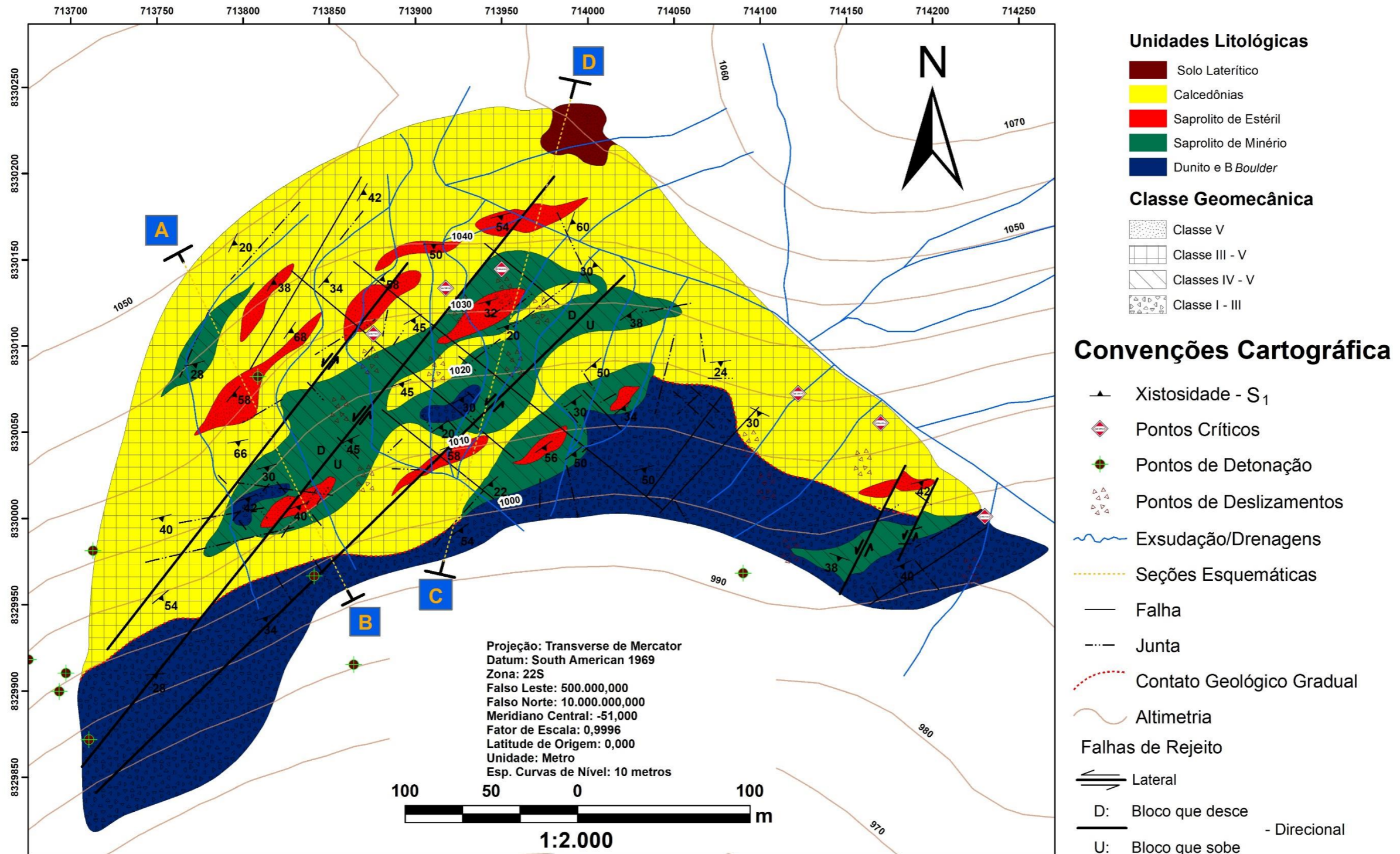
Apêndice C - Mapa de Pontos

Mapa de Pontos: Área 1 - Pit 4 - Frente 1



Apêndice D – Mapa Geológico-Geotécnico

Mapa Geológico - Geotécnico: Área 1 - Pit 4 - Frente 1





SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
REGIONAL GOIÂNIA

Apêndice E – Seções Geológicas-Geotécnicas

