

Trabalho de Formatura  
Curso de Graduação em Geologia

Estabilidade de taludes por meio de análise cinemática e classificação de maciços rochosos  
ao longo da Rodovia Governador Mário Covas (BR 101), município de São Sebastião – SP

Pedro Rafael Aporta Severino

Prof. Dr. Fábio Augusto Gomes Vieira Reis  
Orientador

Rio Claro (SP)

2016

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Câmpus de Rio Claro

PEDRO RAFAEL APORTA SEVERINO

Estabilidade de taludes por meio da análise cinemática e  
classificação de maciços rochosos ao longo da Rodovia  
Governador Mário Covas (BR-101), município de São Sebastião  
– SP

Trabalho de Formatura apresentado ao  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas -  
Câmpus de Rio Claro, da Universidade  
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para  
obtenção do grau de Geólogo.

Rio Claro - SP

2016

## RESUMO

Esse trabalho foca em usar a análise cinemática e métodos de classificação de maciço para investigar pontos que possuem problemas geotécnicos e que possam gerar acidentes ao longo da rodovia Governador Mário Covas (BR 101) entre os km 115 e 121, no município de São Sebastião – SP. A análise cinemática e as classificações geomecânicas de maciços rochosos são ferramentas importantes para a compreensão da estrutura e do comportamento geotécnico da rocha em relação às obras de engenharia e mineração, como túneis, galerias, rodovias e escavações. Essas ferramentas devem ser usadas nas fases iniciais dos projetos para complementar a etapa de investigação, fornecendo informações essenciais para a tomada de decisões no futuro da obra. No entanto, também são usadas em etapas posteriores da conclusão da obra, sendo úteis na manutenção e contenção das estruturas, principalmente nas rodovias onde o fluxo de pessoas e mercadorias é alto e os problemas em caso de acidentes podem ser grandes. Assim, quando os problemas geotécnicos são identificados desde o início, as obras para contenção são simples e econômicas, diferentes de quando há um acidente que envolve interdição da área, interrupção do tráfego, remoção dos materiais, além de danos pessoais e materiais. O trabalho foi elaborado segundo os métodos de classificação geomecânica RMR básico e Sistema-Q, análise cinemática das estruturas geológicas e grau de fraturamento da rocha. A área de estudo apresenta características geológicas e geotécnicas que permitiram a divisão em dois domínios distintos (Norte e Sul), sendo a parte Norte com potencial principalmente para deslizamentos planares e em cunha, e a parte Sul para tombamento de blocos. Alguns pontos requerem maior atenção, como os que apresentam maior grau de alteração da rocha e deslizamentos de solo. Os problemas geotécnicos encontrados podem ser resolvidos com medidas de contenção, como cortinas atirantadas, cortina de encaminhamento, barreiras flexíveis, solo grampeado e muro de arrimo.

Palavras-chave: RMR. Sistema-Q. Classificação de maciços. Mecânica de Rochas. Dips.

## ABSTRACT

This study focuses on using the kinematic analysis and mass classification methods to investigate points that have geotechnical problems and can generate accidents along the highway Governador Mario Covas (BR 101) between km 115 and 121, at the city of São Sebastião – SP. The kinematic analysis and the geomechanical classifications of rock masses are important tools for understanding the structure and the geotechnical behavior of the rock in relation to the constructions and mining, such as tunneling, galleries, highways and excavations. These tools should be used in the early stages of projects to complement the investigation, providing essential information to resolve problems in the future. However, they are also used in later stages, being helpful in maintaining and containment of the structures, especially on highways where the flow of people and products is high and the problems in case of accidents can be huge. Thus, when the geotechnical problems are identified from the beginning, the works to contain are simple and economic, differently from when there is an accident that involves interdiction area, traffic disruption, removal of the materials, in addition to personal injury and property damage. This study was based on the mass classification methods basic RMR and Q-system, the kinematic analysis, and the degree of rock fracturing. The field area shows geologic and geotechnical characteristics that allow the division of area into two portions (North and South), being the North part with main potential to planar and wedge sliding, and the South part to rockfall. Some points need a special attention, as those shown a bigger alteration degree of the rock and soil sliding. The geotechnical problems found can be resolved by containment measures, as anchored wall, rockfall drape, attenuator barriers, soil nailing, and crib wall.

Key words: RMR. Q-System. Rock Mass. Rock Mechanics. Dips.

PEDRO RAFAEL APORTA SEVERINO

Estabilidade de taludes por meio da análise cinemática e  
classificação de maciços rochosos ao longo da Rodovia  
Governador Mário Covas (BR-101), município de São Sebastião  
– SP

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas -  
Câmpus de Rio Claro, da Universidade  
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para  
obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Fábio Augusto Gomes Vieira Reis (orientador)

Prof. Dr. George Luiz Luvizotto

Geol. Rodrigo Irineu Cerri

Rio Claro, 5 de Dezembro de 2016.

Assinatura do (a) aluno(a)

assinatura do(a) orientador(a)

## Sumário

1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Objetivos .....	3
2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	4
2.1 Localização e vias de acesso .....	4
2.2 Geologia Regional.....	5
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	8
3.1 Análise Cinemática .....	9
3.1.1 Dips.....	11
3.2 Classificações Geomecânicas de Maciços Rochosos .....	14
3.2.1 RMR Básico.....	15
3.2.2 Sistema – Q .....	19
3.3 Integração dos Resultados .....	24
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	27
4.1 Análise Cinemática .....	27
4.2 Classificações Geomecânicas .....	53
4.3 Integração dos Resultados .....	55
5. CONCLUSÕES .....	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Problemas geotécnicos em taludes à beira de rodovia. A: Queda de grande bloco de rocha sobre a rodovia Grajaú-Jacarepaguá no Rio de Janeiro em abril de 2011. B: Queda de blocos na rodovia BA-148 na Bahia, trecho de serra entre Livramento de Nossa Senhora e Rio das Contas, em junho de 2014. ....	2
<b>Figura 2.</b> Localização da região de estudo. ....	4
<b>Figura 3.</b> Domínios do Cinturão Ribeira. Em azul claro, divisas estaduais. Destaque em vermelho para a localização da área de estudo. ....	6
<b>Figura 4.</b> Mapa geológico da região de estudo. ....	7
<b>Figura 5.</b> Pontos de coleta de dados na região de estudo. ....	8
<b>Figura 6.</b> Principais tipos de deslizamentos em vertentes e suas representações estereográficas correspondentes. ....	10
<b>Figura 7.</b> Janela de opções de plotagem à esquerda, estereograma no centro e legenda à direita. ....	11
<b>Figura 8.</b> Exemplo ilustrativo dos dados de entrada para confecção da análise cinemática de deslizamento planar. ....	12
<b>Figura 9.</b> Esquema ilustrativo de cone de fricção e escorregamento de um bloco ao longo de um plano. O deslizamento ocorre quando $i > \phi$ ou quando o vetor peso (P) ficar fora do cone de fricção. A: Cone de fricção em um bloco inclinado. B: Projeção do cone de fricção em diagrama de Schmidt-Lambert. ....	12
<b>Figura 10.</b> Exemplo ilustrativo dos dados de entrada para confecção da análise cinemática de deslizamento em cunha. ....	13
<b>Figura 11.</b> Exemplo ilustrativo dos dados de entrada para confecção da análise cinemática de tombamento de blocos. A zona crítica é delimitada pelo limite lateral e o ângulo interno de fricção. ....	14
<b>Figura 12.</b> Sistema RQD. Embora muito utilizado mundialmente, esse sistema não foi usado no trabalho, visto a dificuldade de obter os testemunhos para as análises. ....	18
<b>Figura 13.</b> Divisão da área de estudo em domínios com comportamento geotécnicos distintos. ....	28
<b>Figura 14.</b> Projeção estereográfica de todas as medidas de fratura e foliação coletadas na área. Número de medidas: 227. ....	28
<b>Figura 15.</b> Esquema da interação entre a foliação da rocha e a direção da estrada. ....	29
<b>Figura 16.</b> A: Estereograma representativo para o ponto 1 com o plano que representa a face da vertente. Número de medidas = 16. B: Análise cinemática do ponto 1. ....	31
<b>Figura 17.</b> A: Estereograma representativo para o ponto 2 com o plano que representa a face da vertente. Número de medidas = 16. B: Análise cinemática do ponto 2. ....	33
<b>Figura 18.</b> A: Estereograma representativo para o ponto 3 com o plano que representa a face da vertente. Número de medidas = 11. B: Análise cinemática do ponto 3. ....	34
<b>Figura 19.</b> Estereograma representativo para o ponto 4 com o plano que representa a face da vertente. Número de medidas = 11. B: Análise cinemática favorável a tombamento de blocos no ponto 4. C: Análise cinemática favorável a deslizamento em cunha no ponto 4. ....	35
<b>Figura 20.</b> Estereograma representativo para o ponto 5 com o plano que representa a face da vertente. Número de medidas = 14. B: Análise cinemática do ponto 5. ....	37

<b>Figura 21.</b> Estereograma representativo para o ponto 6 com o plano que representa a face da vertente. Número de medidas = 18. B: Análise cinemática do ponto 6.....	38
<b>Figura 22.</b> Estereograma representativo para o ponto 7 com o plano que representa a face da vertente. Número de medidas = 10. B: Análise cinemática do ponto 7.....	39
<b>Figura 23.</b> Estereograma representativo para o ponto 8 com o plano que representa a face da vertente. Número de medidas = 18. B: Análise cinemática do ponto 8.....	40
<b>Figura 24.</b> Estereograma representativo para o ponto 9 com o plano que representa a face da vertente. Número de medidas = 17. B: Análise cinemática desfavorável a tombamentos de blocos para o ponto 9. C: Análise cinemática favorável a deslizamento planar para o ponto 9. ....	42
<b>Figura 25.</b> Estereograma representativo para o ponto 10 com o plano que representa a face da vertente. Número de medidas = 14. B: Análise cinemática do ponto 10.....	43
<b>Figura 26.</b> Estereograma representativo para o ponto 11 com o plano que representa a face da vertente. Número de medidas = 16. B: Análise cinemática desfavorável a deslizamento planar para o ponto 11. C: Análise cinemática favorável a deslizamento em cunha para o ponto 11. ....	44
<b>Figura 27.</b> Estereograma representativo para o ponto 12 com o plano que representa a face da vertente. Número de medidas = 12. B: Análise cinemática desfavorável a tombamentos de blocos para o ponto 12. C: Análise cinemática favorável a deslizamento em cunha para o ponto 12. ....	46
<b>Figura 28.</b> Estereograma representativo para o ponto 13 com o plano que representa a face da vertente. Número de medidas = 17. B: Análise cinemática do ponto 13.....	47
<b>Figura 29.</b> Estereograma representativo para o ponto 14 com o plano que representa a face da vertente. Número de medidas = 16. B: Análise cinemática favorável deslizamento planar para o ponto 14. C: Análise cinemática favorável a deslizamento em cunha para o ponto 14.....	48
<b>Figura 30.</b> Estereograma representativo para o ponto 15 com o plano que representa a face da vertente. Número de medidas = 21. B: Análise cinemática favorável a deslizamento planar para o ponto 15. C: Análise cinemática favorável a deslizamento em cunha para o ponto 15.....	49
<b>Figura 31.</b> Afloramento apresentando tela e gunitagem como medidas de contenção. Entre os pontos 12 e 13.....	50
<b>Figura 32.</b> Afloramento apresentando tela e gunitagem como medidas de contenção. Entre os pontos 12 e 13.....	51
<b>Figura 33.</b> Afloramentos de muscovita gnaisse com biotita. Blocos caídos ao lado da rodovia. Entre os pontos 10 e 11. ....	51
<b>Figura 34.</b> Pequenos deslizamentos de solo e blocos de rocha ao lado da rodovia. Entre os pontos 14 e 15.....	52
<b>Figura 35.</b> Afloramento de biotita gnaisse com risco de queda de blocos na rodovia. Ponto 11.	52

## ÍNDICE DE QUADROS

<b>Quadro 1.</b> Estimação do ângulo da fricção interna a partir de parâmetros Jr e Ja. ....	13
<b>Quadro 2.</b> Classes de maciço de RMR Básico. ....	16
<b>Quadro 3.</b> Classificação geomecânica de Bieniawski (1989) - "Rock Mass Rating - RMR".....	17
<b>Quadro 4.</b> Classificação das descontinuidades.....	19
<b>Quadro 5.</b> RQD - Designação da qualidade da rocha.....	20
<b>Quadro 6.</b> Jn - Índice das famílias das juntas.....	21
<b>Quadro 7.</b> Jr - Índice de rugosidade das juntas. ....	21
<b>Quadro 8.</b> Ja - Grau de alteração das descontinuidades.....	22
<b>Quadro 9.</b> Jw - Índice das condições hidrogeológicas.....	22
<b>Quadro 10.</b> SRF - Fator de redução das tensões.....	23
<b>Quadro 11.</b> Classes de qualidade de maciço segundo o índice Q, onde A representa um maciço excepcionalmente bom e I um maciço excepcionalmente ruim. ....	23
<b>Quadro 12.</b> Graus de fraturamento. ....	25
<b>Quadro 13.</b> Quantidade de cada tipo de deslizamento.....	29
<b>Quadro 14.</b> Quantidade de cada tipo de deslizamento separados por setor. ....	30
<b>Quadro 15.</b> Classes de qualidade de maciço rochoso segundo RMR Básico e Sistema – Q para o trecho de rodovia estudado.....	53
<b>Quadro 16.</b> Integração dos resultados. (*) locais onde a observação direta de campo confrontou com os resultados obtidos pelas classificações geomecânicas. ....	56

## 1. INTRODUÇÃO

A mecânica de rochas estuda o comportamento mecânico dos maciços rochosos. Essa ciência está fundamentada na resposta das rochas perante os campos de forças a que estão sujeitas no ambiente físico. Em uma visão mais técnica, a mecânica das rochas pretende entender o comportamento do maciço em relação às obras de engenharia. A classificação técnica é parte fundamental para o entendimento do comportamento geotécnico do maciço, a qual permite identificar o material e sua estrutura. São consideradas também as características do maciço rochoso, organizadas individualmente e/ou em grupos, às quais podem ser associadas a comportamentos diferenciados, qualificando o maciço em categorias por meio de nota ou classe.

A classificação deve também refletir o comportamento do maciço em função da obra implantada e das solicitações mecânicas impostas pela mesma (LADEIRA, 1981). Entretanto, esses sistemas de classificações não têm por objetivo substituir os estudos analíticos, medições e observações de campo, mas criar uma ordem no caos que eram os procedimentos de investigação local, fornecendo subsídios necessários ao projeto (BIENIAWSKI, 1989).

Ritter (1879), com o intuito de estabelecer um critério para a abertura de túneis, desenvolveu um sistema específico para a determinação dos tipos de suportes necessários. Desde então, diversos sistemas de classificação de maciços foram criados e modificados. O primeiro, foi proposto por Terzaghi em 1946 para a abertura de túneis suportados por arcos metálicos, um trabalho focado em engenharia de rochas.

Muitos projetos de engenharia civil e mineração passaram a adotar essas classificações visto sua eficiência, e com isso, foram surgindo novas formas de analisar, como os sistemas de classificação multi-parâmetro (WICKHAM **et al.** 1972, BIENIAWSKI 1973 e 1989, BARTON **et al.** 1974). De acordo com Hoek **et al.** (1995), diferentes sistemas de classificação focam em aspectos distintos sobre as diversas características geotécnicas do maciço. Assim, é aconselhado que ao menos dois métodos sejam utilizados durante os estágios iniciais de um projeto.

Além da grande importância das classificações geomecânicas em etapas iniciais em obras de engenharia civil, também são muito utilizadas como ferramentas de manutenção, se tornando essenciais na prevenção de acidentes. Uma vez que a obra está finalizada, sempre haverá a

necessidade de manutenção das estruturas naturais em que envolvem a obra. Um dos grandes problemas recorrentes da população brasileira é a instabilidade de encostas que vem causando graves acidentes, como escorregamentos e queda de blocos, colocando vidas em risco (Figura 1).

Segundo Massad (2003), escorregamento se define como volumes de solos ao longo de superfícies de ruptura bem definidas, cilíndricas ou planares. Os taludes em solo e em rocha estão sujeitos, com relativa frequência, a problemas geotécnicos associados a processos de instabilização de massas (CARVALHO, 1991).

**Figura 1.** Problemas geotécnicos em taludes à beira de rodovia. A: Queda de grande bloco de rocha sobre a rodovia Grajaú-Jacarepaguá no Rio de Janeiro em abril de 2011. B: Queda de blocos na rodovia BA-148 na Bahia, trecho de serra entre Livramento de Nossa Senhora e Rio das Contas, em junho de 2014.



Fonte: A – Carlos Eduardo Cardoso / Agência O Dia; B – João Batista / L12 Notícias.

Como consequência da movimentação de grandes volumes de solo e de rocha, diversas áreas são afetadas, provocando danos pessoais e materiais, além de paralisação de atividades operacionais e interrupção de tráfego. Além disso, o resultado da falta de estudos geológico-geotécnicos na fase de projeto e/ou a negligência das manutenções, pode causar um alto dano financeiro.

O DNIT (2009) estima que em 2007 foram gastos aproximadamente R\$ 92 milhões de reais com obras de recuperação de encostas, estabilização de taludes, eliminação de erosões, perfazendo 33,5% do total gasto com obras emergenciais em rodovias federais (MATTOS, 2009). Esses problemas quando identificados em estágios iniciais, podem ser resolvidos por obras simples e econômicas, e que contribuem para maior segurança do tráfego nas estradas e rodovias.

Um meio de identificar e classificar o potencial de risco para uma determinada área é pela análise estrutural em taludes e classificações geomecânicas de maciços. Esses estudos podem ser úteis para indicar áreas emergenciais, que devem ser priorizadas para medidas de contenção e prevenção de acidentes. Nesse trabalho foi utilizado dois métodos de classificação geomecânica: RMR (**Rock Mass Rating**) básico (BIENIAWSKI, 1989) e Sistema – Q (BARTON **et al.**, 1974). Além dos sistemas de classificações de maciço, foram realizadas análises cinemáticas e a determinação do grau de fraturamento do local de estudo.

## **1.1 Objetivos**

O trabalho visa realizar classificações geomecânicas e análise cinemática nos taludes em rocha localizados ao longo da rodovia Governador Mário Covas (BR-101), entre os km 115 e 121. Por esses meios, é possível indicar regiões onde o maciço está em boas ou más condições geotécnicas e que carecem ou não de métodos de remediação e contenção. Assim, os fenômenos de instabilidade, como queda de blocos e escorregamentos, podem ser evitados.

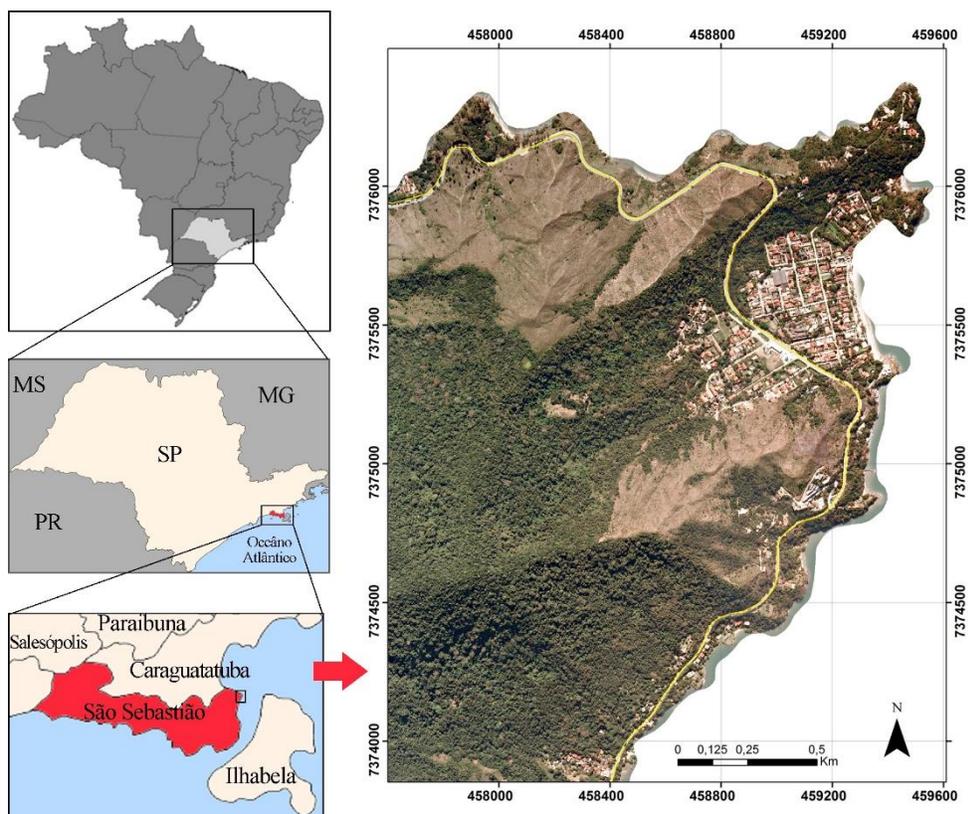
## 2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Nesse capítulo será apresentada a localização da área de estudo, bem como suas principais vias de acesso, e o contexto geológico em que está inserida.

### 2.1 Localização e vias de acesso

A região de estudo está localizada a 198 km a leste de São Paulo, tendo como principal via de acesso, a partir de São Paulo, a rodovia SP-070 e rodovia Governador Carvalho Pinto, acessando a rodovia dos Tamoios em São José dos Campos até a BR-101 no km 115. Especificamente, está a área de estudo localizada entre os km 115 e 121 da rodovia Governador Mário Covas (BR-101), município de São Sebastião, litoral do estado de São Paulo (Figura 2).

**Figura 2.** Localização da região de estudo.



## 2.2 Geologia Regional

A região de São Sebastião está inserida no Sistema Orogênico Mantiqueira, associado ao Ciclo Brasileiro, de idade Neoproterozóica, que deu origem ao Supercontinente Gondwana. Esse sistema orogênico é determinado como uma faixa ao longo da região costeira entre o sul da Bahia até o Rio Grande do Sul, se estendendo até o Uruguai. Possui aproximadamente 3.000 km de comprimento e 200 km de largura na parte sul e 600 km na parte norte.

As rochas que formam Sistema Mantiqueira são datadas de idade neoproterozóica, ocorrendo também rochas mais antigas, de idade arqueana, paleoproterozóica e mesoproterozóica (HEIBRON **et al.**, 2004). Algumas exceções discretas são conhecidas, como diques de diabásio e corpos alcalinos do Cretáceo e Paleogeno, coberturas sedimentares representadas por depósitos cretáceos e coberturas sedimentares neogênicas-quadernárias (HASUI **et al.**, 2012).

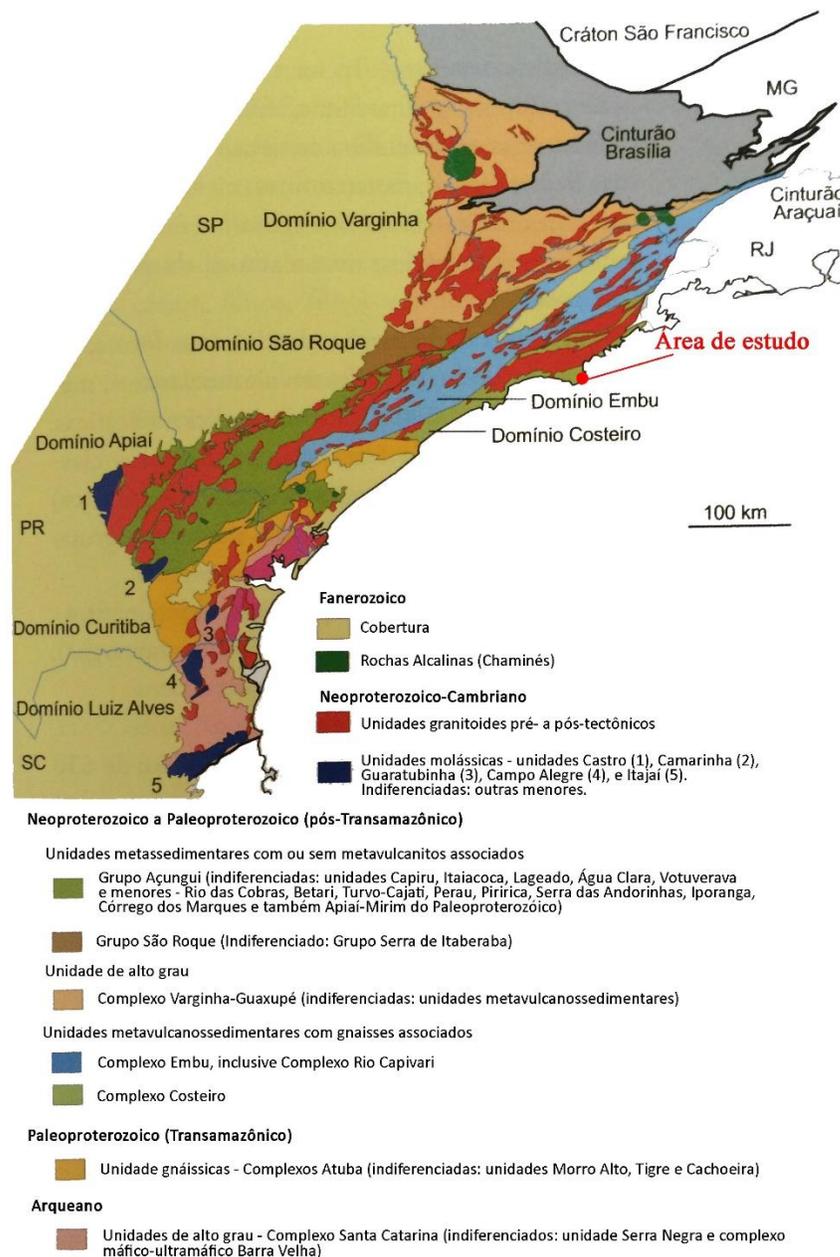
As rochas pré-silurianas são os registros dos processos que ocorreram entre o arqueano até cerca de 450 milhões de anos (Ma), no Ciclo Brasileiro. Os processos foram de divergência, acarretando a fragmentação do Supercontinente Rodínia, separação e deriva dos continentes e abertura de oceanos, seguidos de convergência, resultando na aproximação e reaglutinação de continentes no Megacontinente Gondwana, completando o Ciclo de Wilson. O encerramento do Ciclo Brasileiro é marcado pelo colapso gravitacional e exumação dos orógenos, representando a passagem de condições de forte atividade compressiva para estabilização intraplaca, por volta de 450 Ma (HASUI **et al.**, 2012).

O Sistema Orogênico Mantiqueira foi dividido em três partes, primordialmente como setentrional, central e meridional (ALMEIDA; HASUI, 1984) ou mais recentemente como cinturões orogênicos: Araçuaí - Setentrional, Ribeira - Central e Tijuca - Meridional (HASUI, 2010).

A região de estudo está inserida no cinturão Ribeira, que é dividida em oito domínios, sendo: Varginha, Apiaí, São Roque, Embu, Costeiro, Curitiba, Paranaguá e Luiz Alves (Figura 3). A estruturação geral está orientada para N35E no oeste do Domínio Apiaí e varia gradativamente para leste, chegando a N55E nos domínios Curitiba e Paranaguá. O aspecto estrutural de maior destaque no cinturão Ribeira é a deformação transcorrente que atuou após ou em parte acompanhando tardiamente os cavalgamentos no final do Ciclo Brasileiro e transfigurou o cinturão

com feixe de zonas de cisalhamento compondo o Sistema Transcorrente Paraíba do Sul (HASUI; OLIVEIRA, 1984; EBERT; HASUI, 1998; HEIBRON *et al.*, 2004; HASUI *et al.*, 2012).

**Figura 3.** Domínios do Cinturão Ribeira. Em azul claro, divisas estaduais. Destaque em vermelho para a localização da área de estudo.



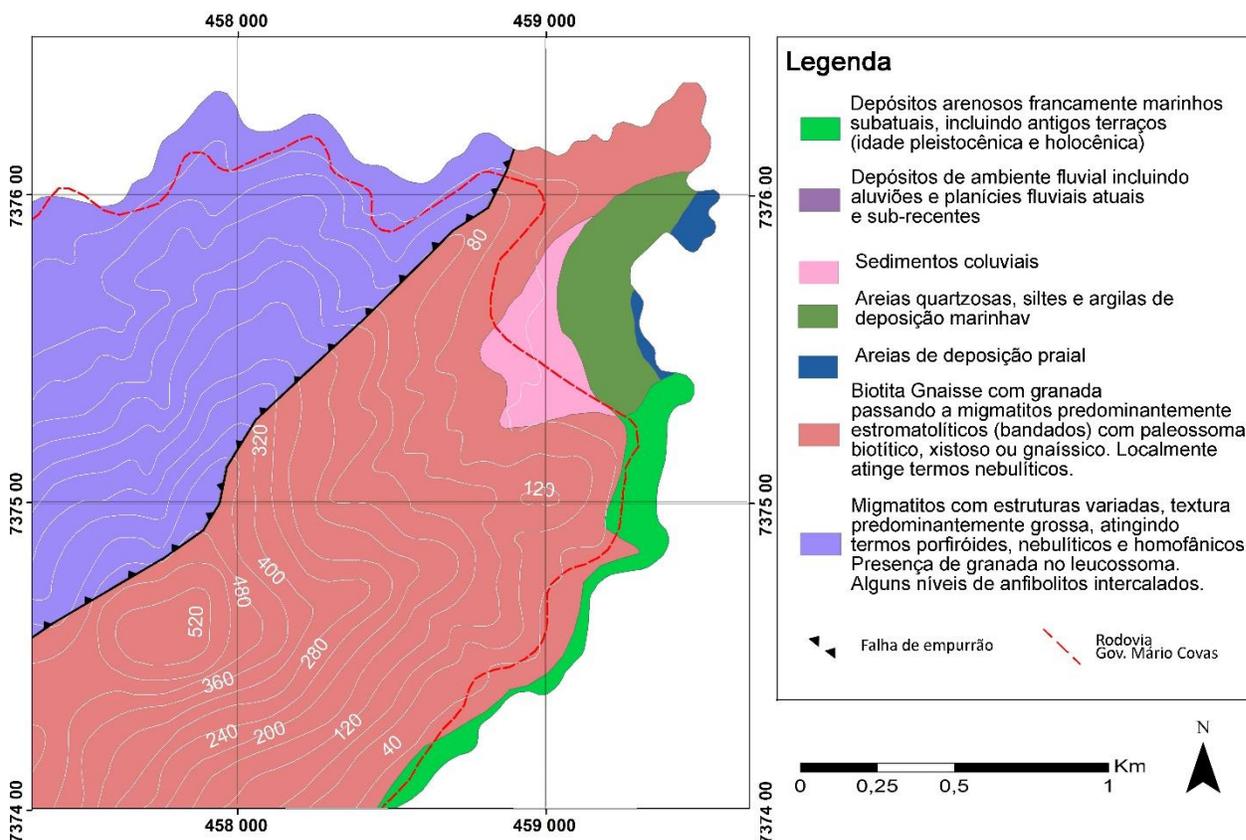
Fonte: Hasui et al. (2012).

Especificamente, a área de estudo pertence ao Domínio ou Complexo Costeiro, que apresenta predominância de gnaisses peraluminosos ricos em granada e sillimanita, com

intercalações métricas a decamétricas de quartzitos, além da presença de biotita gnaiss bandados, rochas calciossilicatadas e anfibólitos (HEIBRON et al., 2004). O Complexo Costeiro é delimitado pelas Falhas de Cubatão e Taxaquara, com associação à Zona de Transcorrência São Paulo (HASUI, 1978; CAMPANHA et al., 1994).

As rochas cristalinas da área são de idade proterozóica (Figura 4), consistindo de gnaisses bandados, rochas granitognáissicas migmatíticas, ortognáisses e paragnáisses do Complexo Costeiro, e por granitos e cataclasitos associados a zonas de cisalhamento, podendo estar cortadas pelos enxames de diques do Jurássico Superior e Cretáceo Inferior (HASUI et al., 2012; SILVA, 2013; CAMPANHA et al., 1994; CHIEREGATI et al., 1982).

**Figura 4.** Mapa geológico da região de estudo.

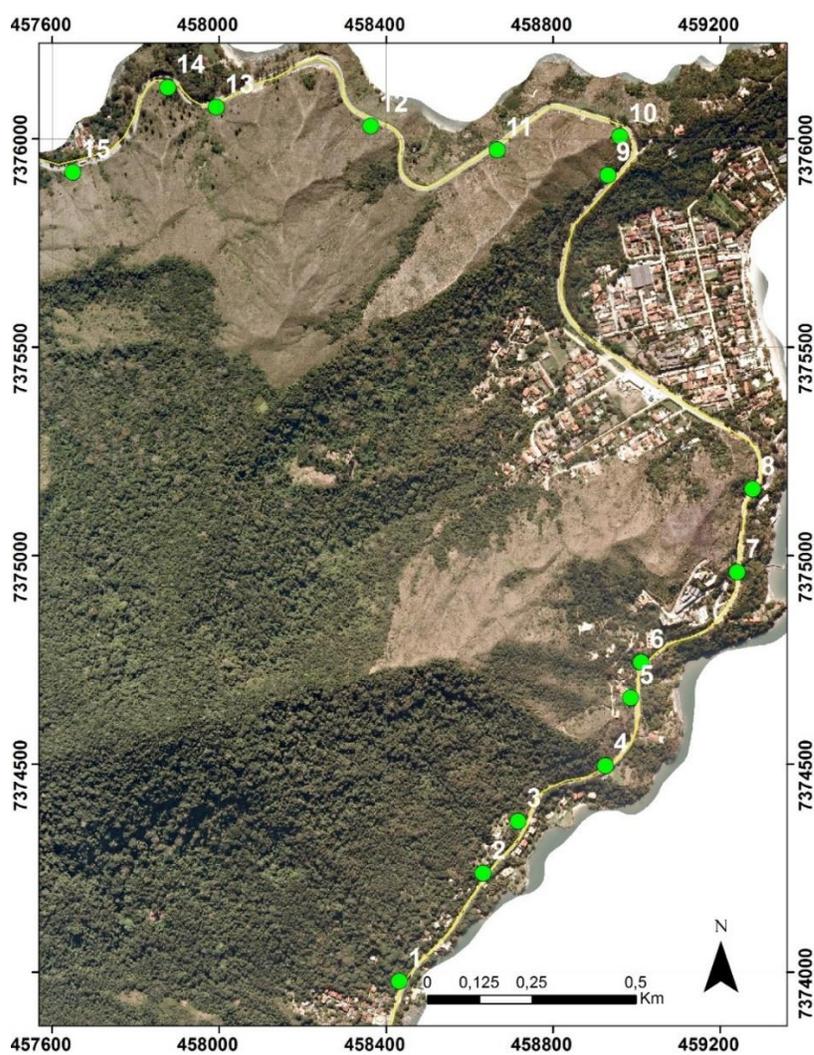


Fonte: Modificado de Silva; Mafra; Tominaga (1996).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa teve sua base ancorada em geologia estrutural e mecânica de rochas. Foram analisados 15 pontos ao longo do trajeto, conforme mostra a Figura 5. Os métodos aplicados para a obtenção dos resultados se resumem, a partir da coletada de dados estruturais em afloramentos (falhas, juntas e foliações), em: (1) Análise cinemática, (2) classificações geomecânicas de maciços rochosos, e (3) grau de fraturamento. Os métodos serão abordados detalhadamente a seguir.

**Figura 5.** Pontos de coleta de dados na região de estudo.



### 3.1 Análise Cinemática

A identificação dos modelos potenciais de escorregamentos é um pré-requisito fundamental para a análise da estabilidade e manipulação de taludes (FIORI; CARMIGNANI, 2009). Geralmente, são classificados três tipos principais de escorregamentos: escorregamentos planares, escorregamentos em cunha e tombamento de blocos.

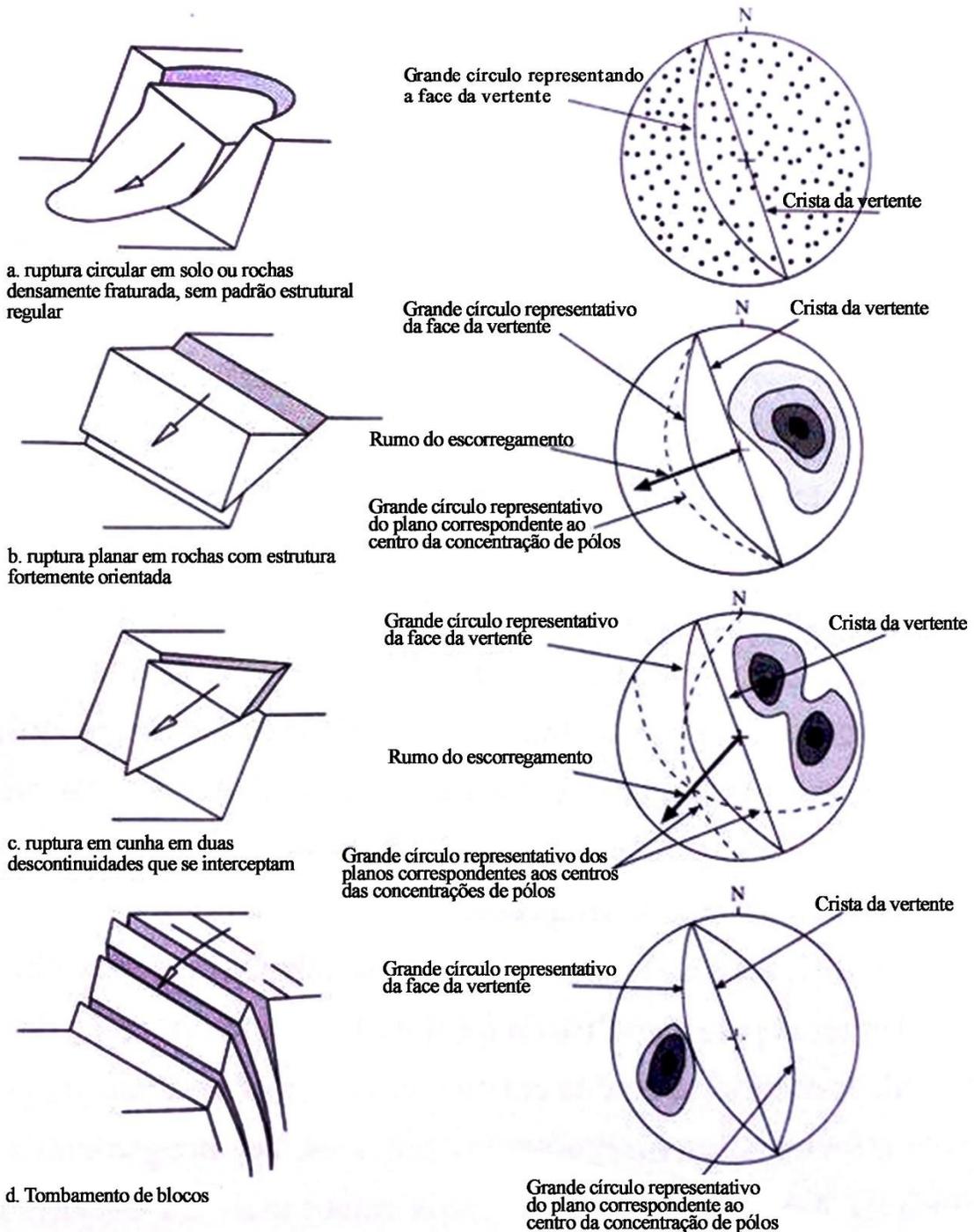
A cinemática refere-se à movimentação de corpos, sem fazer, entretanto, referência às forças que causam o movimento (FIORI; CARMIGNANI, 2009). A finalidade das análises cinemáticas é a determinação dos pontos em que o maciço se comporta de forma menos estável, para apontar locais que necessitam de medidas de contenção.

Primeiramente, é adotado o método de medição de fraturas e juntas por bússola **Clar** para medir o mergulho e o rumo do mergulho destas estruturas. As medidas estruturais foram todas realizadas em taludes de corte ao longo do trecho da rodovia. Essa análise, em conjunto com outras informações, ajuda a entender o grau de fraturamento do maciço e, assim, o tipo de movimento de massa.

Posteriormente, os dados estruturais foram interpretados com o auxílio do **software Dips 7.0**, pertencente à plataforma **RocScience**. Foram gerados estereogramas para cada ponto de coleta de dados e, a partir desses, foi possível analisar as estruturas que estão na zona crítica, ou seja, que são mais susceptíveis a deslizamentos em cunha ou planares e a quedas de blocos.

A Figura 6 ilustra os tipos de rupturas mais comum encontradas em maciços rochosos e a representação estereográfica das condições estruturais do maciço, suscetíveis de fornecer os tipos de ruptura para cada caso (HOEK; BRAY, 1981).

**Figura 6.** Principais tipos de deslizamentos em vertentes e suas representações estereográficas correspondentes.



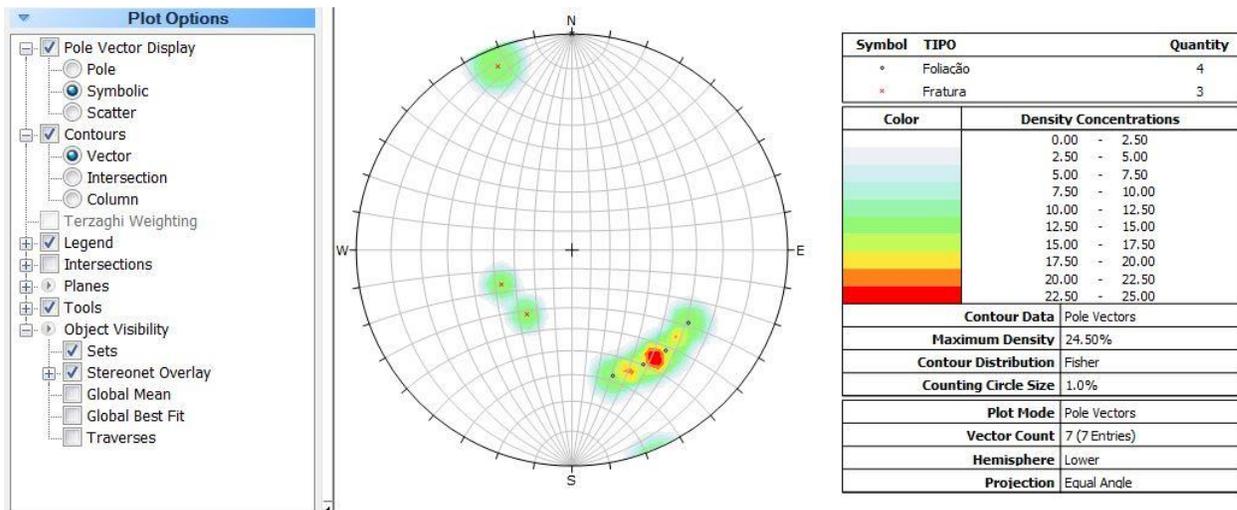
Fonte: Hoek e Bray (1981).

### 3.1.1 Dips

O **Software** Dips pertence a plataforma **Rocscience** que possui programas para a mecânica de rochas, capaz de realizar análises gráficas e estatísticas sobre os dados. Pode ser usado para análise de dados, escavações, mineração, estabilidade de taludes e construção de túneis.

O modo de entrada para projeção estereográfica é a submissão das medidas estruturais de acordo com a tabela padrão do programa. Para melhorar a aparência dos dados já plotados no estereograma, a janela de opções de plotagem à esquerda (Figura 7) fica livre para a escolha da melhor maneira de apresentar os dados.

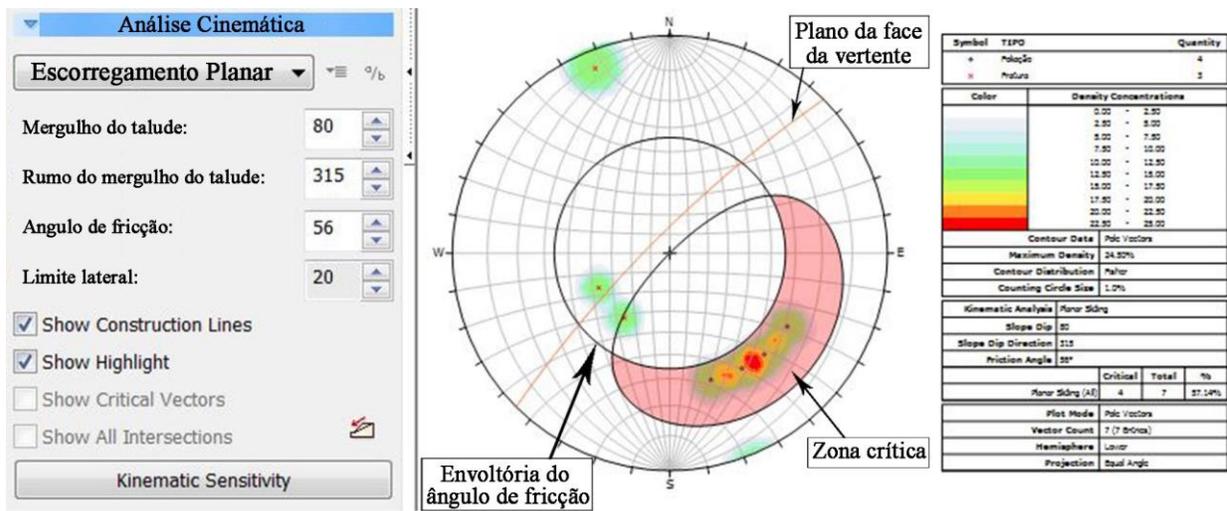
**Figura 7.** Janela de opções de plotagem à esquerda, estereograma no centro e legenda à direita.



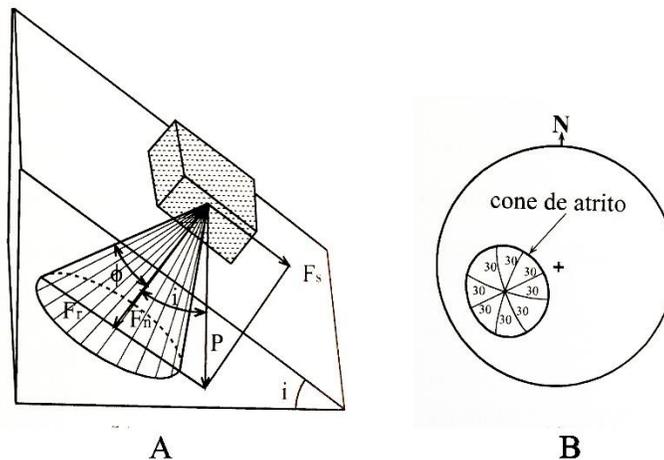
As análises cinemáticas são baseadas nas medidas estruturais que foram submetidas na etapa de entrada dos dados. A Figura 8 mostra um exemplo para deslizamento planar e os campos de zona crítica, ângulo de fricção e mergulho e rumo do mergulho do talude.

O ângulo de fricção é um parâmetro de condição básica para a aplicação da projeção estereográfica no estudo de estabilidade de talude em rocha. Segundo Fiori & Carmignani (2009), se um bloco de rocha tiver liberdade para se movimentar em qualquer direção, o envelope de todas as forças atuantes nele é um cone, que é representado como um círculo na projeção (Figura 9), cuja geratriz perfaz um ângulo em torno do polo da superfície. Dependendo do ângulo, o bloco permanecera em repouso se a resultante das forças permanecer dentro do cone de atrito.

**Figura 8.** Exemplo ilustrativo dos dados de entrada para confecção da análise cinemática de deslizamento planar.



**Figura 9.** Esquema ilustrativo de cone de fricção e escorregamento de um bloco ao longo de um plano. O deslizamento ocorre quando  $i > \phi$  ou quando o vetor peso (P) ficar fora do cone de fricção. A: Cone de fricção em um bloco inclinado. B: Projeção do cone de fricção em diagrama de Schmidt-Lambert.



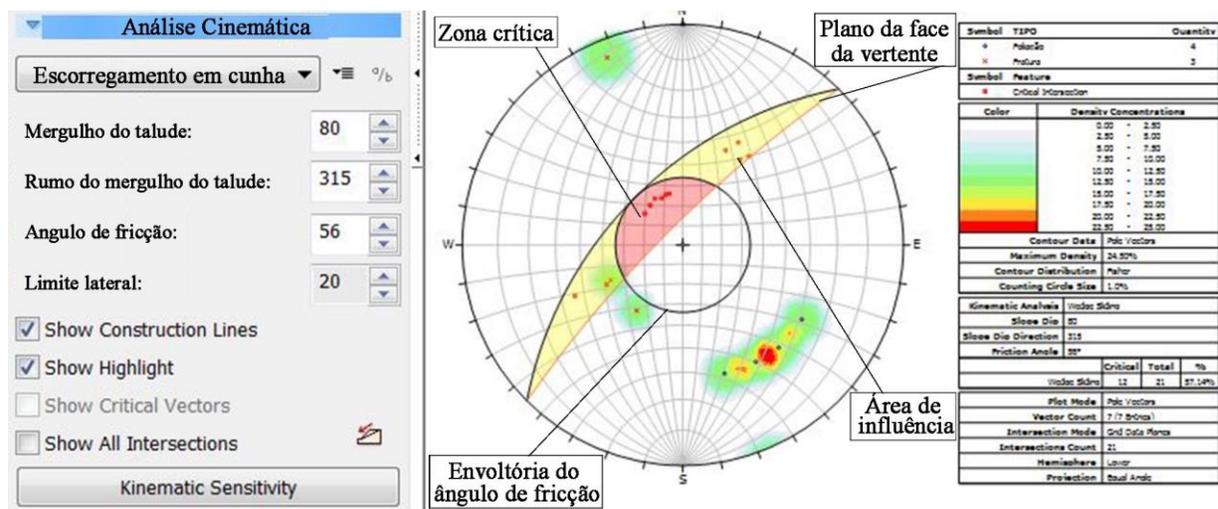
Para este trabalho, a estimativa do ângulo de fricção segue a proposta de Barton et al., (1974) que utiliza dos parâmetros  $J_r$  e  $J_a$ , que se remete a característica da rugosidade e da alteração das famílias de fraturas, respectivamente (Quadro 1). Esses parâmetros serão utilizados para compor o método de classificação geomecânica Sistema-Q.

**Quadro 1.** Estimação do ângulo da fricção interna a partir de parâmetros Jr e Ja.

Descrição	Jr	tan-1 (Jr/Já)				
		Já=0,75	1	2	3	4
Fraturas descontínuas	4	79°	76°	63°	53°	45°
Rugosa, ondulada	3	70°	72°	56°	45°	37°
Lisa, ondulada	2	69°	63°	45°	34°	27°
Estrias, ondulada	1,5	36°	56°	37°	27°	21°
Rugosa, plana	1,5	36°	56°	37°	27°	21°
Estrias, plana	0,5	34°	27°	14°	9,5°	7,1°

Fonte: Barton **et al.**, 1974.

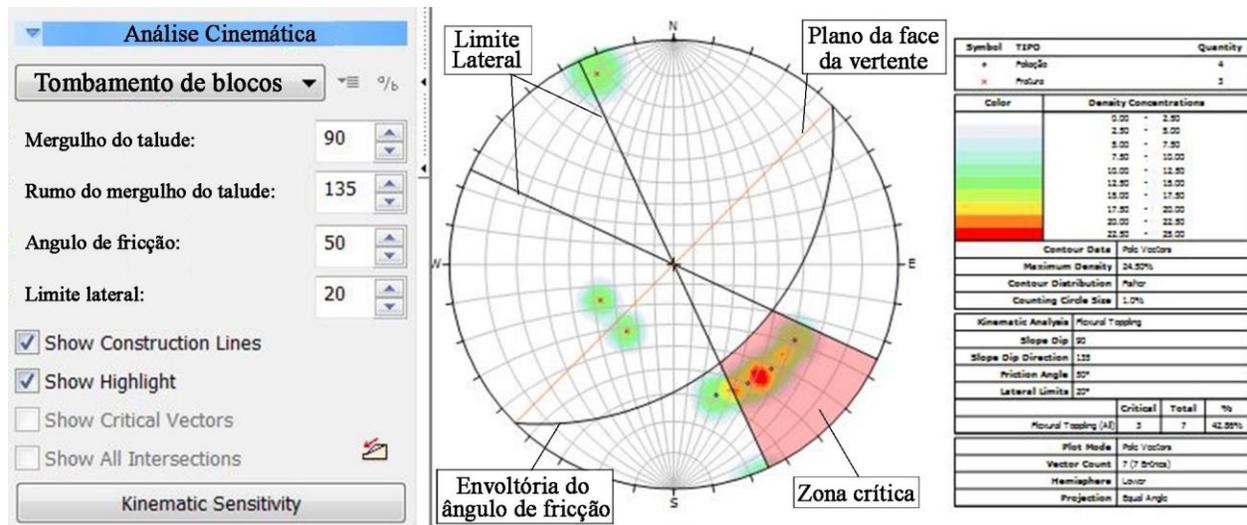
Para as análises de deslizamentos em cunha (Figura 10), a entrada de dados é a semelhante ao do deslizamento planar. A diferença é que nesse caso um novo campo é formado no estereograma, o da área de influência para a formação das cunhas (Amarelo). Os polos de intersecção contidos nessa zona significam que não estão totalmente estáveis, porém com menor risco diante daqueles contidos na zona crítica.

**Figura 10.** Exemplo ilustrativo dos dados de entrada para confecção da análise cinemática de deslizamento em cunha.

As análises cinemáticas para tombamento de blocos (Figura 11), envolvem os mesmos fatores que as anteriores, com a inclusão do limite lateral, que representa o limite teórico de todos os possíveis planos dos quais podem surgir através face do talude. Na prática, tem sido observado que planos de rupturas tendem a ocorrer apenas se a direção do mergulho de um plano estiver

dentro de um intervalo angular da direção de mergulho do talude. Esse limite é empírico e os valores variam entre 20 e 30 graus (GOODMAN, 1989; HUDSON e HARRISON, 1997). Para esse trabalho, adotamos um padrão de 20 graus para todas as análises.

**Figura 11.** Exemplo ilustrativo dos dados de entrada para confecção da análise cinemática de tombamento de blocos. A zona crítica é delimitada pelo limite lateral e o ângulo interno de fricção.



### 3.2 Classificações Geomecânicas de Maciços Rochosos

As classificações geomecânicas consideram as características do maciço rochoso, organizando-as individualmente e/ou em grupos, as quais podem ser associadas à comportamentos diferenciados do meio rochoso, qualificando o maciço em categorias por meio de nota ou classe.

Essas classificações são utilizadas para caracterizar os maciços rochosos através de um conjunto de propriedades identificadas por observação direta e ensaios realizados **in situ**. A partir do resultado obtidos, é possível indicar regiões onde o maciço está em condições geotécnicas boas ou ruins e que carecem ou não de métodos de remediação e contenção. Assim, os fenômenos de instabilidade, como os deslizamentos, que provocam graves acidentes, podem ser evitados.

Para o presente trabalho, foram adotados dois métodos de classificação de maciços: **Rock Mass Ratings** – RMR (BIENIAWSKI, 1989) e o Sistema – Q (BARTON **et. al.**, 1974).

### 3.2.1 RMR Básico

Os trabalhos realizados por Bieniawski desde 1970 ajudaram a fomentar e evoluir os conhecimentos no campo da mecânica de rochas. Seu primeiro trabalho publicado sobre classificação de maciços é de 1976, que durante os anos seguintes passou por mudanças e em 1989 se consolidou, sendo atualmente muito utilizada e sucessivamente refinado, à medida que são incluídos resultados de análises de um maior número de casos práticos. Esse trabalho se baseou na versão de 1989.

A classificação de Bieniawski, propõe a análise de seis parâmetros que, segundo o autor, são mais significantes para o comportamento dos maciços rochosos. Os parâmetros utilizados 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.

Para esses parâmetros, atribui-se pesos e a somatória destes resulta em um índice, chamado RMR. A partir desse índice, é possível indicar a classe de qualidade do maciço estudado, dentre as cinco propostas pelo autor (Quadro 2).

Apesar do método RMR de Bieniawski ter sido criado para obras subterrâneas, como túneis e galerias de minas, esse sistema é bastante utilizado em outros ambientes, como em taludes. Dessa forma, o parâmetro 6 será desprezado, constituindo o sistema RMR Básico, quando a orientação das descontinuidades em relação à escavação não é considerada (SINGH; GOEL, 1999).

**Quadro 2.** Classes de maciço de RMR Básico.

Peso global	100-81	80-61	60-41	40-21	<21
Classe	I	II	III	IV	V
Descrição	Maciço rochoso muito bom	Maciço rochoso bom	Maciço rochoso razoável	Maciço rochoso fraco	Maciço rochoso muito fraco
Tempo médio para aguentar sem suporte	20 anos para 15m de vão	1 ano para 10 m de vão	1 semana para 5 m de vão	10 horas para 2,5 m de vão	30 minutos para 1 m de vão
Coesão da massa rochosa (kPa)	>400	300-400	200-300	100-200	<100
Ângulo de atrito da massa rochosa (°)	>45	35-45	25-35	15-25	<15

Fonte: Bieniawski, 1989.

O quadro 3 apresenta os pesos relacionados aos parâmetros analisados. O primeiro parâmetro analisa a resistência da rocha à compressão uniaxial. Esse dado pode ser obtido através do teste de carga pontual (Point Load) ou pelo teste de compressão uniaxial. Para esse trabalho, foi adotado um padrão de 162 Mpa para todos os pontos de coleta de amostra (Goodman, 1989).

O segundo parâmetro, chamado R. Q. D (**Rock Quality Designation**), foi proposto por Deere (1988). Esse sistema de classificação baseia-se na averiguação da qualidade do maciço rochoso a partir dos testemunhos de sondagens realizados com recuperação contínua de amostra. O índice é definido como a percentagem da somatória de todos pedaços de testemunhos maiores que 10 cm dividido pelo comprimento total do furo (Figura 12). Para a aplicação desse sistema no presente trabalho, foi adotada uma versão do sistema R. Q. D volumétrico proposta por Palmstrom (1982), no qual não são necessários os testemunhos de sondagem.

**Quadro 3.** Classificação geomecânica de Bieniawski (1989) - "Rock Mass Rating - RMR".

Parâmetros		Coeficientes							
1	Resistência da rocha intacta	Point Load	> 10 Mpa	4 - 10 Mpa	2 - 4 Mpa	1 - 2 Mpa	Ver compressão uniaxial		
		Compressão uniaxial	> 250 Mpa	100 - 250 Mpa	50 - 100 Mpa	25 - 50 Mpa	5-25 Mpa	1-5 Mpa	<1 Mpa
	Pesos	15	12	7	4	2	1	0	
2	R.Q.D.	90 - 100 %	75 - 90 %	50 - 75 %	25 - 50 %	< 25 %			
	Pesos	20	17	13	8	3			
3	Espaçamento das descontinuidades	> 2m	0,6 - 2 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	<60 mm			
	Pesos	20	15	10	8	5			
4	Condição das descontinuidades		Superfícies muito rugosas, não contínuas, sem separação, paredes de rocha não alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação <1 mm, paredes ligeiramente alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação <1mm, paredes muito alteradas	Superfícies polidas ou enchimento com espessura <5mm ou juntas contínuas com separação 1-5mm	Enchimento mole com espessura >5mm ou juntas contínuas com separação >5mm		
	Pesos		30	25	20	10	0		
5	Presença de água	Caudal por 10m de comprimento do túnel	Nenhum	< 10 l/min	10 - 25 l/min	25 - 125 l/min	> 125 l/min		
		Relação pressão da água vs tensão principal máxima	0	< 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5		
		Condições gerais	Completamente seco	Água intersticial	Úmido	Escorrimentos	Entrada de água		
	Pesos		15	10	7	4	0		

Fonte: Bieniawski, 1989.

As análises das descontinuidades foram feitas em afloramentos rochosos e transformadas para o índice RQD pela seguinte relação proposta:

$$RQD = 115 - 3,3 \times Jv$$

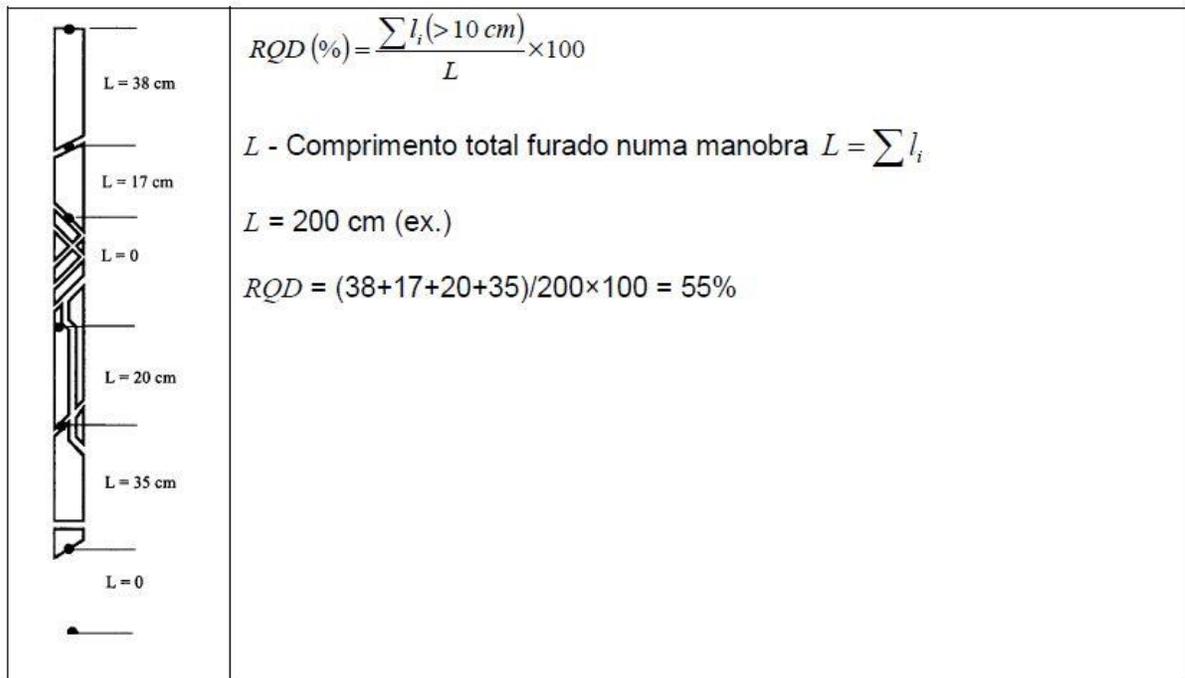
$Jv$  representa o índice volumétrico de juntas, determinado pela somatória do inverso número de descontinuidades por metro, ou seja:

$$Jv = \sum_{i=1}^n \frac{1}{S_i}$$

onde,

S = número de famílias de descontinuidades.

**Figura 12.** Sistema RQD. Embora muito utilizado mundialmente, esse sistema não foi usado no trabalho, visto a dificuldade de obter os testemunhos para as análises.



Fonte: Deere (1988)

Deve-se salientar que a classificação de maciços baseada apenas no índice RQD é bastante limitada. Esse índice é de grande importância quando somado a outros fatores, como os parâmetros aqui descritos pelo método RMR.

Para determinar as condições das descontinuidades (parâmetro 4) é necessária a avaliação de cinco características, que podem ser consultadas na Quadro 4.

Os dados foram coletados por observação direta dos afloramentos e anotados em ficha de campo. Os equipamentos utilizados foram bússola brunton e régua telescópica de 5 metros.

**Quadro 4.** Classificação das descontinuidades.

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 rugoso	Quase liso	Liso
Peso	6	5	3	1	0
Enchimento	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: Bieniawski (1989).

### 3.2.2 Sistema – Q

O Sistema – Q de classificação geomecânica foi criado por Barton, Lien e Lund em 1974 e se baseia principalmente em obras subterrâneas. O índice de qualidade Q é determinado seguindo a análise de seis fatores que foram considerados importantes para a caracterização e entendimento do comportamento geotécnico do maciço rochoso. Esse índice é representado pela seguinte expressão:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a} \frac{J_w}{SRF}$$

onde,

RQD = **Rock Quality Designation** (Designação da qualidade da rocha);

J<sub>n</sub> = Número de famílias de juntas no espaço medido;

$J_r$  = Índice de rugosidade das juntas;

$J_a$  = Índice de alteração das descontinuidades;

$J_w$  = Índice de condição hidrogeológicas (presença de água) e

SRF = Stress Reduction Factor (Fator de redução de tensões)

Os valores desses parâmetros serão apresentados a seguir, do Quadro 5 ao Quadro 10. O índice Q é muito variado, abrangendo de  $Q=0,001$  a  $Q=1000$  em uma escala logarítmica de qualidade de maciço.

O Sistema – Q tem sua aplicação comum em obras subterrâneas, sendo o fator SRF relacionado com tensões em profundidade. Visto que esse trabalho foca em afloramentos de superfície, sem grandes tensões, foi adotado um padrão de tensões baixas e próximas da superfície (SRF = 2.5), segundo o Quadro 10. As classes do Sistema – Q são apresentadas no Quadro 11.

**Quadro 5.** RQD - Designação da qualidade da rocha.

Descrição do Parâmetro		Valor	Notas
<i>Rock Quality Designation</i>		R. Q. D.	1. Quando o RQD for >10 (incluindo 0) considera-se um valor nominal de 10 no cálculo de Q 2. Intervalos de 5 no RQD têm precisão suficiente (100, 95, 90, ...)
A	Muito ruim	0-25	
B	Ruim	25-50	
C	Médio	50-75	
D	Bom	75-90	
E	Muito bom	90-100	

Fonte: Barton et al., 1974.

**Quadro 6.** Jn - Índice das famílias das juntas.

Descrição do Parâmetro		Valor	Notas
<i>Joint set number</i>		Jn	1. Nas intersecções utilizar 3 x Jn  2. Nas embocaduras utilizar 2 x Jn
A	Nenhuma ou poucas descontinuidades presentes	0,5 - 1,0	
B	Uma família de descontinuidades	2	
C	Uma família mais descontinuidades esparsas	3	
D	Dois famílias de descontinuidades	4	
E	Dois famílias mais descontinuidades esparsas	6	
F	Três famílias de descontinuidades	9	
G	Três famílias mais descontinuidades esparsas	12	
H	Quatro ou mais famílias, descontinuidades esparsas, maciços muito fraturados	15	
I	Rochas esmagada, tipo terroso	20	

Fonte: Barton et al., 1974.

**Quadro 7.** Jr - Índice de rugosidade das juntas.

Descrição do Parâmetro		Valor	Notas
<i>Joint roughness number</i>		Jr	1. As descrições das alíneas a) e b) referem-se a escalas de amostragem e média dimensão, respectivamente.  2. Adicionar 1,0 se o espaçamento médio da família de descontinuidades mais relevantes for maior que 3 m.  3. Jr igual a 0,5 pode ser usado para descontinuidades polidas e planas contendo lineações, se essas lineações estiverem orientadas na direção de menor resistência.
a) Contato entre as paredes de rocha das descontinuidades b) Contato entre as paredes de rocha antes de 10cm de escorregamento			
A	Juntas descontínuas	4	
B	Descontinuidades rugosas, irregulares, onduladas	3	
C	Descontinuidades suaves e onduladas	2	
D	Descontinuidades polidas e onduladas	1,5	
E	Descontinuidades rugosas ou irregulares, planas	1,5	
F	Descontinuidades lisas, planas	1	
G	Descontinuidades polidas, planas	0,5	
c) Não há contato entre as paredes de rocha no escorregamento			
H	Zona contendo minerais argilosos e suficiente espessa de modo a impedir o contato entre as paredes	1	
I	Zonas esmagadas contendo areias de modo a impedir o contato entre as paredes	1	

Fonte: Barton et al., 1974.

**Quadro 8.** Ja - Grau de alteração das descontinuidades.

Descrição do Parâmetro		Valor	
<i>Joint alteration number</i>		Ja	$\Phi_r$ (°) aprox.
a) Contato entre as paredes de rocha das descontinuidades			
A	Paredes duras, compactas, preenchimento impermeável (quartzo ou epibolito)	0,75	-
B	Paredes não alteradas, somente com leve descolação	1	25 - 35
C	Paredes ligeiramente alteradas, com partículas arenosas e rochas desintegradas não brandas	2	25 - 30
D	Paredes com partículas siltsosas ou areno-argilosas	3	20 - 25
E	Paredes com partículas de materiais moles ou de baixo ângulo de atrito, tais como mica, gesso, talco, e pequenas quantidades de argilas expansivas	4	8 - 16
b) Contato entre as paredes de rocha das descontinuidades antes de 10 cm de escorregamento			
F	Paredes com partículas de areia e rochas desintegradas, etc.	4	25 - 30
G	Descontinuidades com preenchimento argiloso sobreconsolidado (contínuo, mas com espessura <5 mm)	6	16 - 24
H	Descontinuidades com preenchimento argiloso subconsolidado (contínuo, mas com espessura <5 mm)	8	12 - 16
I	Descontinuidades com enchimento argiloso expansivo; o valor de Ja depende da porcentagem de partículas de argila expansiva e do acesso da água, etc.	8 - 12	6 - 12
c) Não há contato entre as paredes de rocha das descontinuidades			
J	Zonas ou bandas com rochas desintegradas ou esmagadas com argila (ver G, H, e I para condições do material argiloso)	6,8 ou 8-12	6 - 24
K	Zonas ou bandas siltsosas ou areno-argilosas, com pequena fracção de argila	5	-
L	Zonas contínuas de argila (ver G, H, e I para condições do material argiloso)	10,13, 13-20	6 - 24

Nota: Os valores do ângulo de atrito residual ( $\phi_r$ ) devem considerar-se como um guia aproximado das propriedades mineralógicas dos produtos de alteração

Fonte: Barton et al., 1974.

**Quadro 9.** Jw - Índice das condições hidrogeológicas.

Descrição do Parâmetro		Valor		Notas
Join water reduction		Jw	Pressão da água aprox. (Mpa)	
A	Escavações secas ou caudal afluído pequeno, isto é <5 l/min localmente	1	<0,1	1. Os fatores nos casos C e F são estimados para condições naturais; o parâmetro Jw deverá ser aumentado caso sejam efetuadas drenagens. 2. Os problemas especiais relacionados com a formação de gelo não são considerados.
B	Caudal médio ou pressão que ocasionalmente arraste o preenchimento das descontinuidades	0,66	0,1 - 0,25	
C	Caudal ou pressão elevada em rochas competentes sem preenchimento	0,5	0,25 - 1	
D	Caudal ou pressão elevada, com considerável arrastamento do preenchimento das descontinuidades	0,3	0,25 - 1	
E	Caudal excepcionalmente elevado ou pressão explosiva, decaindo com o tempo	0,2 - 0,1	>1	
F	Caudal excepcionalmente elevado ou pressão contínua, sem decaimento	0,1 - 0,05	>1	

Fonte: Barton et al., 1974.

**Quadro 10.** SRF - Fator de redução das tensões.

Descrição do Parâmetro		Valor	Notas	
<i>Strees Reduction Factor</i>		SRF	1. Reduzir o índice SRF de 25 a 50% se as zonas de corte influenciarem a escavação sem a atravessarem	
a) Zonas de fraqueza intersectando as escavações, o que pode causar a descompressão do maciço rochoso durante a abertura destas				
A	Zonas de fraqueza frequentes, contendo argila ou rocha decomposta quimicamente: maciço rochoso envolvente muito descomprimido (todas as profundidades)	10	2. No caso de maciços rochosos contendo argila, é conveniente obter o índice SRF para as cargas de descompressão. A resistência da matriz rochosa é então pouco significativa. Em maciços muito pouco fraturados e sem argila.	
B	Zonas de fraqueza individuais, contendo argila ou rocha decomposta quimicamente (profundidade da escavação $\leq 50$ m)	5		
C	Zonas de fraqueza individuais, contendo argila ou rocha decomposta quimicamente (profundidade da escavação $> 50$ m)	2,5		
D	Numerosas zonas de corte em rocha competente, sem argila; rocha envolvente descomprimida (todas as profundidades)	7,5		
E	Zonas individuais de corte em rocha competente, sem argila (profundidade da escavação $\leq 50$ m)	5		
F	Zonas individuais de corte em rocha rígida, sem argila (profundidades da escavação $> 50$ m)	2,5		
G	Juntas abertas, rocha muito fraturada e descomprimida (todas as profundidades)	5		
b) Rocha competente, problemas de tensões na rocha				
H	Tensões baixas, próximo da superfície	2,5	$>200$	$>13$
I	Tensões médias	1	200-10	13-0,66
J	Tensões altas, estrutura rochosa muito fechada (usualmente favorável para a estabilidade; pode ser desfavorável para a estabilidade das paredes)	0,5 - 2	10-5	0,66-0,33
K	Explosões moderadas de rochas (rocha maciça)	5 - 10	5-2,5	0,33-0,16
L	Explosões intensas de rochas (rocha maciça)	10 - 20	$<2,5$	$<0,16$
c) Rocha esmagada: plastificação de rochas incompetentes sob a influência de altas pressões de rocha				
M	Pressão moderada da rocha esmagada	5 - 10		
N	Pressão elevada da rocha esmagada	10 - 20		
d) Rochas expansivas: atividade química expansiva devida à presença da água				
O	Pressão de expansão moderada	5 - 10		
P	Pressão de expansão elevada	10 - 15		

Fonte: Barton et al., 1974.

**Quadro 11.** Classes de qualidade de maciço segundo o índice Q, onde A representa um maciço excepcionalmente bom e I um maciço excepcionalmente ruim.

Índice Q	1000-400	400-100	100-40	40-10	10-4	4-1	1-0,1	0,1-0,01	0,01-0,001
Descrição	Excepc. Bom	Extrem. Bom	Muito Bom	Bom	Regular	Ruim	Muito Ruim	Extrem. Ruim	Excepc. Ruim
Classe	A	B	C	D	E	F	G	H	I

Fonte: Barton et al., 1974.

Os parâmetros da expressão de Barton podem ser divididos e interpretados separadamente, pelos três quocientes da equação, fornecendo três aspectos relativos ao maciço rochoso:

- $RQD/J_n$  determina a estrutura do maciço e indica uma medida de bloco unitário, pertencente ao maciço, que varia entre 200 e 0,5 e sugere uma ideia genérica da dimensão dos blocos;
- $J_r/J_a$  caracteriza as descontinuidades e seu preenchimento, sob o ponto de vista da rugosidade e do grau de alteração. A resistência ao corte está ligada diretamente a essa relação, uma vez que o aumento da rugosidade e diminuição da alteração das paredes indicam um aumento da resistência ao corte e quando há preenchimentos argilosos entre as fraturas ou estas fraturas se encontram abertas, a resistência ao corte diminui.
- $J_w/SRF$  representa o estado de tensão do maciço rochoso. O parâmetro  $J_w$  indica a medida da pressão da água, que influencia diretamente na resistência do colapso das descontinuidades. O fator SRF (**Stress Reduction Factor**) está relacionado ao estado de tensão no maciço em profundidade.

### 3.3 Integração dos Resultados

Nesse trabalho, serão gerados três tipos principais de dados para a integração dos resultados: as classificações geomecânicas (RMR e Q), as análises cinemáticas e o grau de fraturamento do maciço. Para unificá-los e garantir a comparação entre eles, foi apresentado uma tabela com todos os resultados alcançados. Contudo, para essa análise comparativa, é importante entender o que cada resultado representa e a importância de um perante ao outro.

As classificações geomecânicas analisam a qualidade do maciço diante de fatores como número de família de fraturas e suas características físicas. Esses fatores, em cada um dos métodos, são essenciais para estipular as qualidades geotécnicas do maciço e, assim, dar sequência no projeto em questão ou não. Os métodos são utilizados para apontar a qualidade do maciço. Porém, em alguns pontos, podem não expressar realmente o cenário real. Dessa forma, a análise visual, por observação direta, é fator importante e pode ser determinante para julgar um local, mesmo que contraponha com os métodos.

A caracterização da geometria dos planos de fraturas e de suas intersecções não são levadas em consideração nas classificações geomecânicas. Esse estudo cabe à análise cinemática, que prevê os planos que estão susceptíveis à escorregamentos, sejam eles planares, em cunha ou tombamento de blocos.

Muitos blocos em taludes escavados em rocha estão em condições estáveis, muito embora contenham planos de fraqueza bastante inclinados. Isso ocorre quando não há liberdade de movimentação ao longo de todas as superfícies de fraqueza que os delimitam, pois existem impedimentos para sua livre movimentação. No entanto, uma vez retirado o impedimento por qualquer processo (erosão, escavação ou crescimento de fraturas) o bloco (ou blocos) ficará livre e deslizará em seguida (FIORI; CARMIGNANI, 2009).

Apesar desses resultados fornecerem uma ampla visão do comportamento do maciço rochoso, caracterizando-o por classes, notas e condições favoráveis ou não à escorregamentos, é necessário um detalhamento preciso sobre as discontinuidades e suas relações entre si. A determinação do grau de fraturamento do maciço pode ser utilizado para complementar essa discussão.

O grau de fraturamento do maciço é expresso pela quantidade de discontinuidades por metro linear de maciço. Geralmente, é utilizado na descrição de testemunhos, diferindo do espaçamento por não considerar a distância perpendicular entre as fraturas da mesma família. Entretanto, podemos utilizar o parâmetro espaçamento se considerarmos a somatória das discontinuidades em todas as famílias encontradas. Guidicini **et al.**, (1972a) propõe a classificação do grau de fraturamento, segundo a Tabela 11.

**Quadro 12.** Graus de fraturamento.

<b>SIGLAS</b>	<b>Número de fraturas por metro</b>	<b>Denominação</b>
F1	<1	Ocasionalmente fraturado
F2	1 - 5	Pouco fraturado
F3	6 - 10	Medianamente fraturado
F4	11 - 20	Muito fraturado
F5	>20	Extremamente fraturado

Fonte: Guidicini **et al.**, (1972a)

Dessa forma, os resultados apresentados serão:

- Classificações Geomecânicas (RMR Básico e Sistema-Q);

- Análise Cinemática;
- Grau de fraturamento do maciço.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo serão apresentados os resultados e as discussões referentes às informações sobre análise cinemática e as classificações geomecânicas coletadas em campo. Foram analisados 15 pontos ao longo do trajeto (Figura 5).

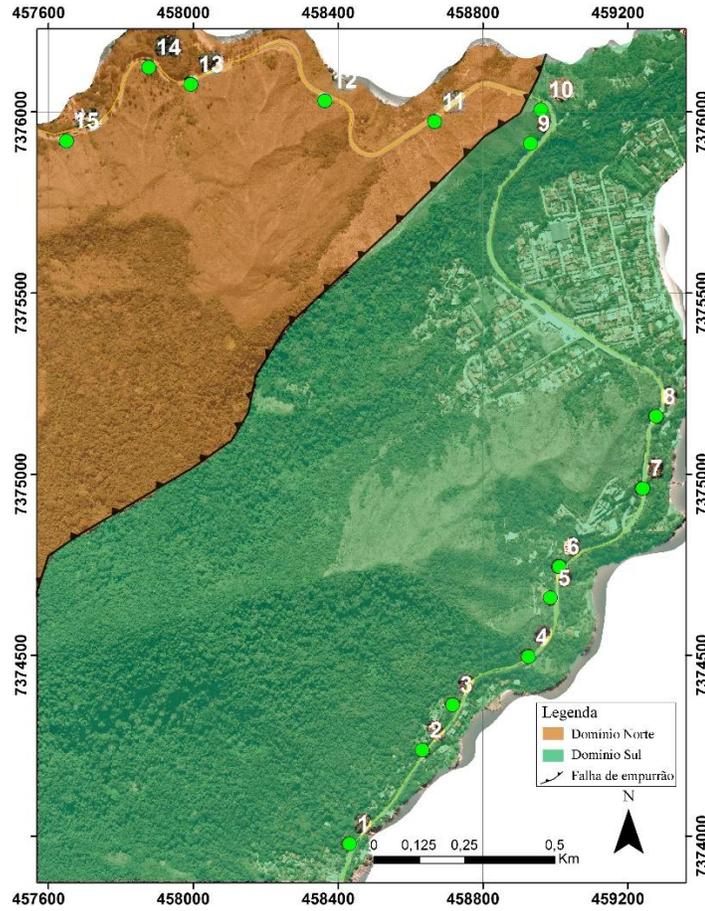
### 4.1 Análise Cinemática

Os dados estruturais levantados em campo foram basicamente medidas de fraturas e foliações. Foi usado o Software Dips, da plataforma RocScience, para a confecção dos estereogramas de cada ponto de coleta de dados, mostrando medidas estruturais (foliação e fraturas) para as famílias de fraturas do ponto em que foi coletada. Os afloramentos apresentaram entre duas e quatro famílias de fraturas.

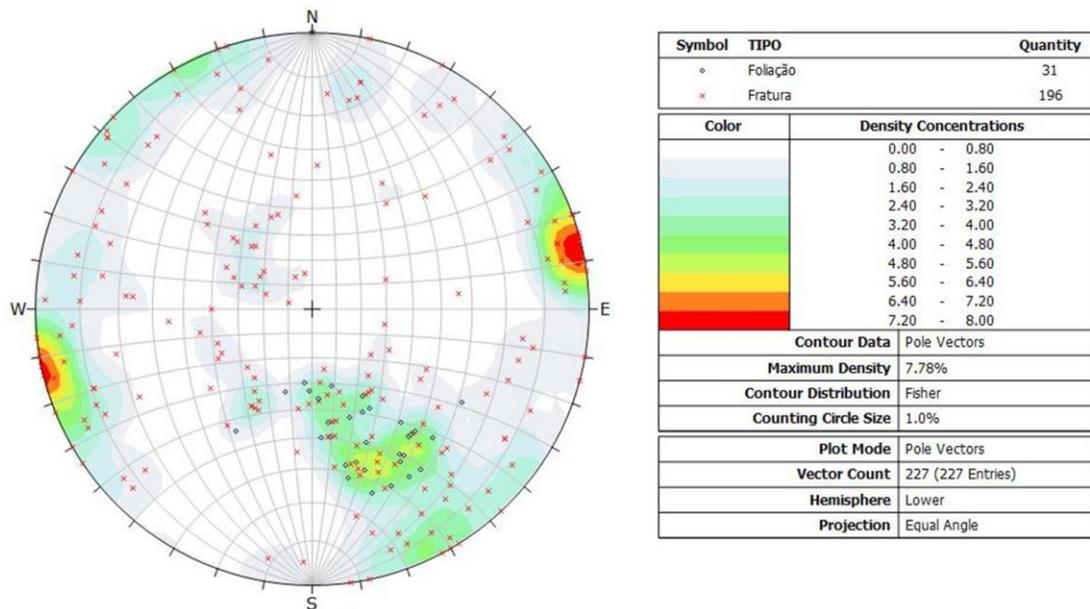
Apesar dessas análises apontarem problemas geotécnicos ao longo de todo o trajeto estudado, podemos ver um comportamento diferente o que permite a separação da área em dois domínios distintos (Figura 13). A porção norte da área, que é delimitada pela fálha na qual separa as duas principais litologias presentes, mostra condições muito piores quando comparadas a porção sul.

A grande parte dos problemas na parte sul é caracterizada por tombamento de blocos, que pode ser explicado pela orientação preferencial da foliação do maciço em relação a orientação da rodovia. A rodovia, até o ponto 10, tem orientação geral NE-SW e, portanto, os taludes que a acompanham possuem a mesma orientação, com caimento para SE. De acordo com a projeção estereográfica de todas as medidas estruturais (fraturas e foliações) coletadas (Figura 14), a foliação da região tem a mesma orientação da rodovia, porém com caimento para NW, o que configura um cenário de tombamento de blocos.

**Figura 13.** Divisão da área de estudo em domínios com comportamento geotécnicos distintos.

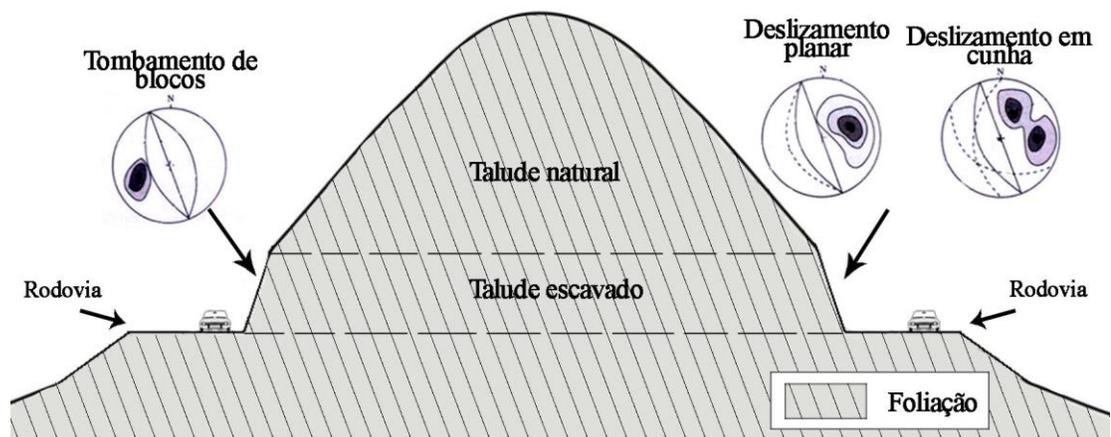


**Figura 14.** Projeção estereográfica de todas as medidas de fratura e foliação coletadas na área. Número de medidas: 227.



Já na porção norte, após o ponto 10, a rodovia muda de direção variando entre NW-SE e NE-SW, e assim, os taludes que a bordejam possuem caimento para NE e NW, respectivamente. Em alguns locais dessa porção, mesmo a rodovia mantendo a mesma direção da parte sul (NE-SW), os caimentos dos taludes agora diferem e, antes sendo discordantes, agora eles concordam com a foliação presente (Figura 15). Esse cenário é característico dos deslizamentos planares e em cunha, e coincide com o que foi encontrado nessa área. É possível analisar a variação das estruturas e da face do talude em função da direção da rodovia, de acordo com o Apêndice I – Mapa de pontos com estereogramas.

**Figura 15.** Esquema da interação entre a foliação da rocha e a direção da estrada.



O Quadro 13 mostra a quantidade de cada tipo de deslizamento levantados pelas análises cinemáticas realizadas. A divisão da área em dois domínios (Norte e Sul) está representada estatisticamente no Quadro 14, no qual apresenta a quantidade de deslizamentos para cada setor. O setor Norte tem potencial para deslizamentos planar e em cunha. Já o setor Sul, tem potencial para tombamento de blocos.

**Quadro 13.** Quantidade de cada tipo de deslizamento.

Tipo	Deslizamento Planar	Deslizamento em cunha	Tombamento de blocos	Estável
Quantidade	4	7	7	2

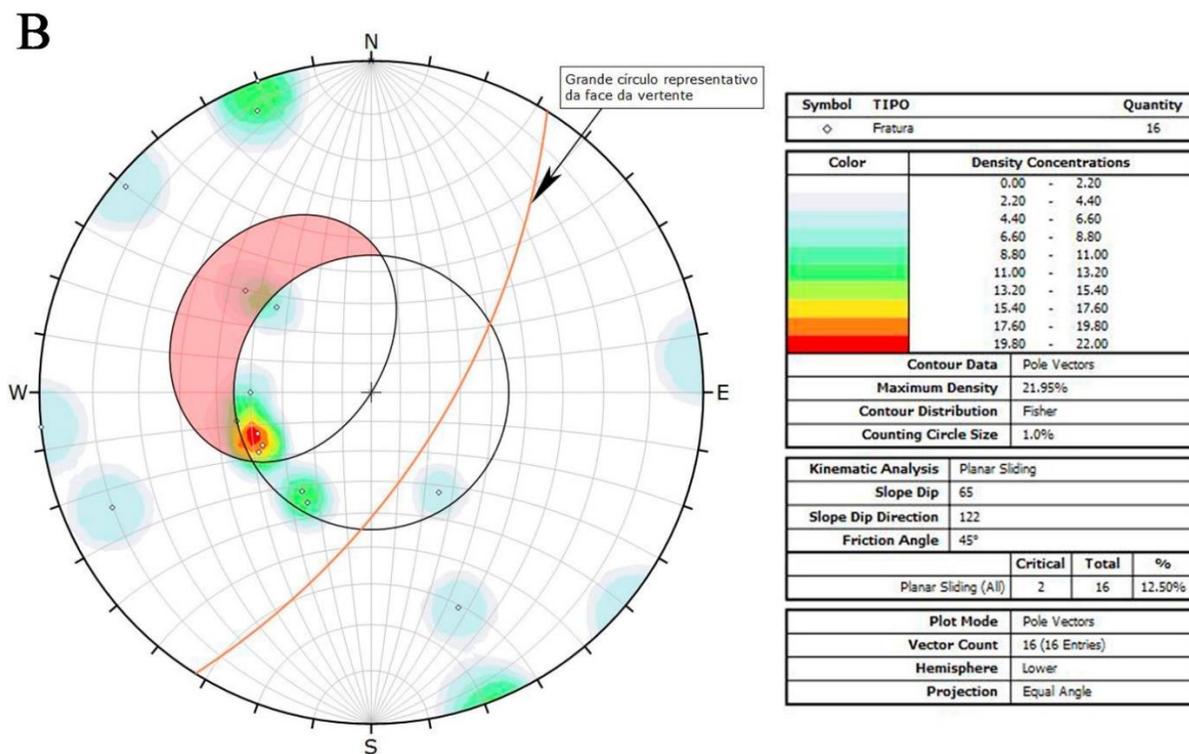
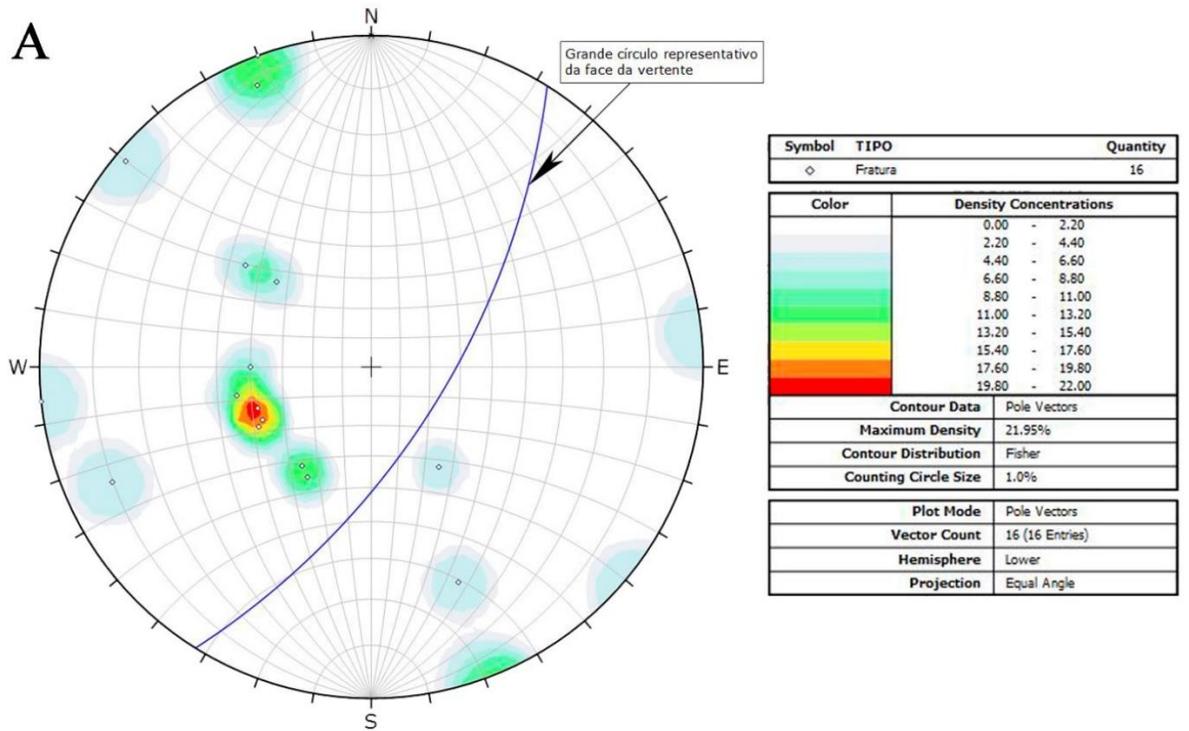
**Quadro 14.** Quantidade de cada tipo de deslizamento separados por setor.

Região\Tipo	Deslizamento planar	Deslizamento em cunha	Tombamento de blocos	Estáveis
Norte	3	6	1	0
Sul	1	1	6	2

As análises cinemáticas foram realizadas para cada ponto, a partir da representação estereográfica das condições estruturais do maciço (Figura 6) proposta por HOEK e BRAY (1981). Foram determinados locais com favoráveis deslizamentos planares, deslizamentos em cunha e tombamento de blocos. A seguir, será apresentado a projeção estereográfica e a análise cinemática para cada trecho.

A Figura 16A apresenta a projeção estereográfica dos polos dos planos de descontinuidades levantados no ponto 1 e o plano representativo para a face do talude. Há um adensamento de polos com direções de plano que variam entre NW-SE com caimento para NE e NE-SW com caimento para SE. A direção do talude é NE-SW com caimento para SE, o que significa que esses planos de descontinuidade estão concordando com a direção do talude, indicando um possível deslizamento planar. A análise cinemática (Figura 16B) confirma a possibilidade de deslizamento planar, com 2 pólos estão na zona crítica (em vermelho), o que indica apenas dois planos, dentre os 16, com potencial para desenvolver o colapso. Próximo à zona crítica, há uma concentração de polos que mesmo não inclusos na zona crítica, devem ser levados em consideração e confirmados também como planos com potencial risco de colapso.

**Figura 16.** A: Estereograma representativo para o ponto 1 com o plano que representa a face da vertente. Número de medidas = 16. B: Análise cinemática do ponto 1.

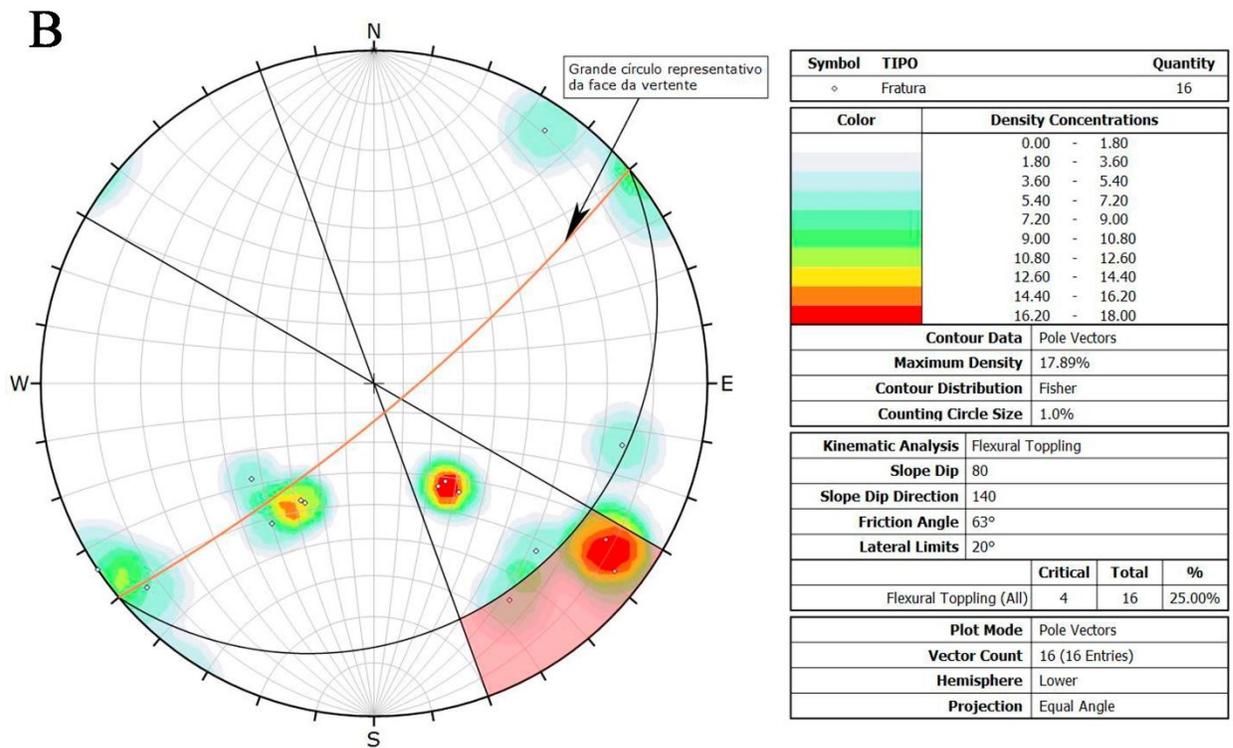
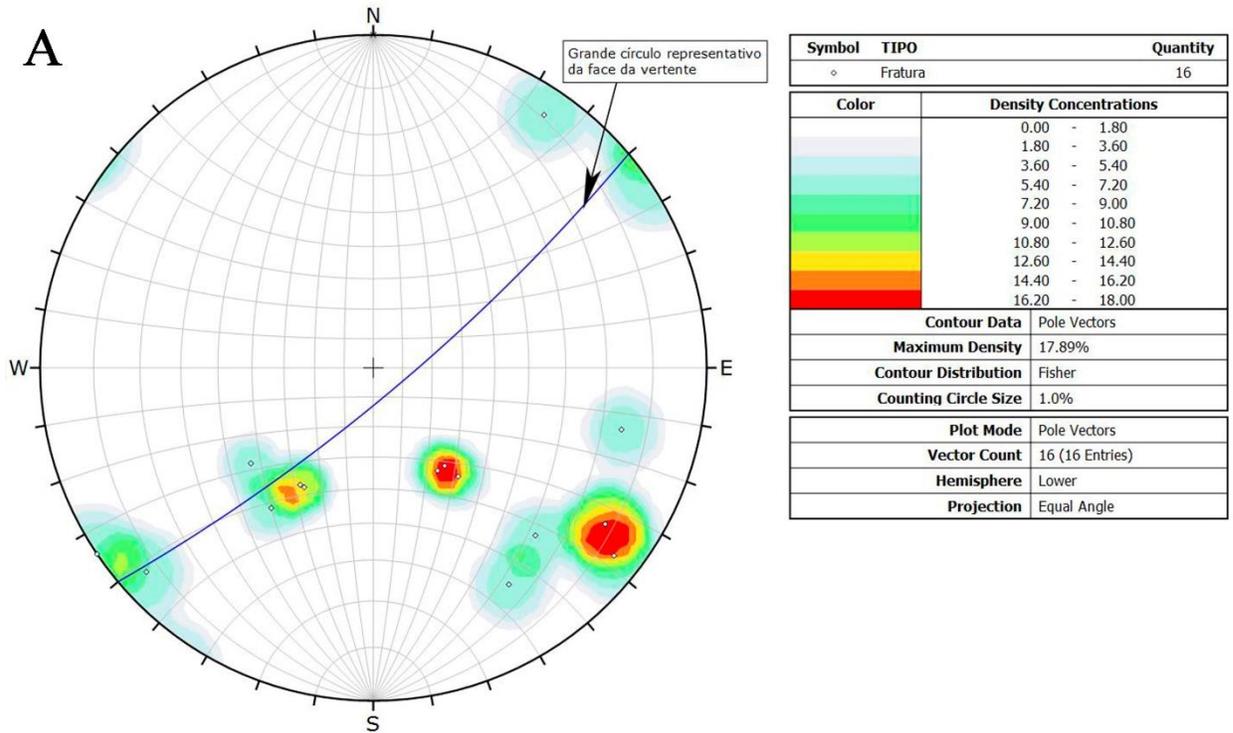


A figura 17A mostra a projeção estereográfica dos polos dos planos de descontinuidades encontrados no ponto 2 e o plano representativo para a face do talude. Nota-se o adensamento de polos em 3 regiões, indicando 3 famílias distintas de fraturas. A família de maior expressão possui planos com direções NE-SW e alto mergulho para NW. A direção do talude é NE-SW com alto mergulho para SE. Essa configuração, onde planos de descontinuidades e a face da vertente possuem a mesma direção com mergulhos opostos, caracteriza tombamento de blocos. A figura 17B mostra a análise cinemática e confirma essa hipótese, onde há 4 polos presentes na zona crítica (em vermelho), relacionados à 4 planos favoráveis ao tombamento de blocos.

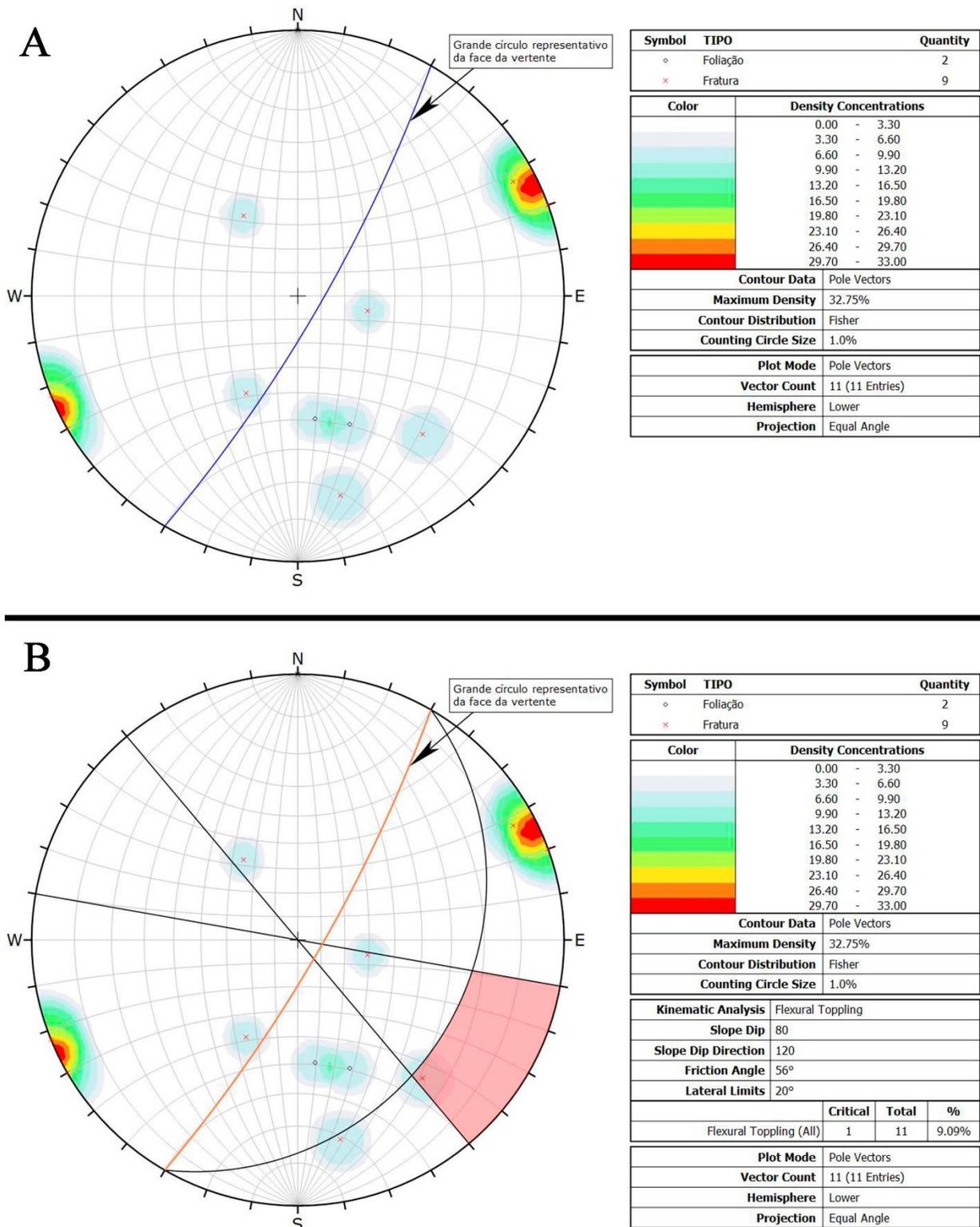
Para o ponto 3, projeção estereográfica dos polos dos planos de descontinuidades e o plano representativo para a face do talude está apresentada na Figura 18A. Nesse ponto não há nenhum adensamento de polos, o que representa descontinuidades sem padrão e dispersas. O talude tem direção NE-SW com alto mergulho para SE. Alguns planos de fraturas possuem a mesma direção do talude, porém com mergulho moderado para NW. A análise cinemática (Figura 18B) aponta ao tombamento de blocos como colapso com maior potencial a ocorrer. Contudo, apenas um polo está inserido na zona crítica (em vermelho), o que indica um plano favorável ao tombamento.

A figura 19A mostra a projeção estereográfica dos polos dos planos de descontinuidades encontrados no ponto 4 e o plano representativo para a face do talude. O talude tem direção NE-SW com mergulho para SE. Nesse ponto três pequenos grupos de polos em porções bem distintas e que podem ser consideradas como famílias de fraturas independentes. Dessa forma, destaca-se duas principais famílias: uma com direção NE-SW e caimento para SE e outra também com direção NE-SW, porém com caimento para NW. Nesse caso, existe potencial para a ocorrência de dois tipos de deslizamento em vertentes: tombamento de blocos e deslizamento em cunha. A figura 19B mostra o primeiro caso, no qual a família que possui mesma direção do talude, mas com caimento oposto, configura o tombamento de blocos. Possui apenas 1 polo na zona crítica (em vermelho). O segundo caso é mostrado na Figura 19C, na qual mostra a zona crítica formada pelos planos que variam entre as direções NW-SE com caimento para NE e EW com caimento para S.

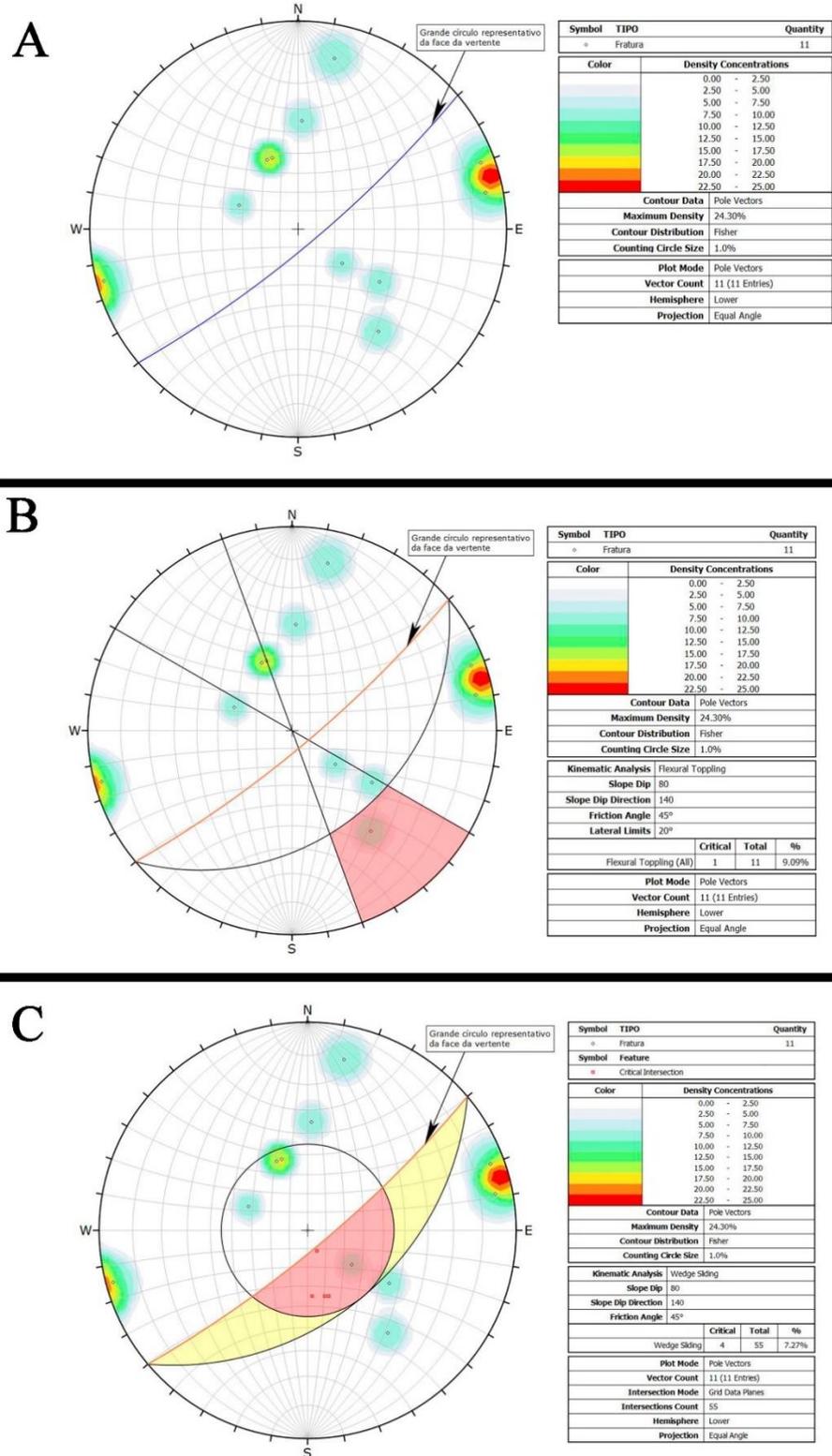
**Figura 17.** A: Estereograma representativo para o ponto 2 com o plano que representa a face da vertente. Número de medidas = 16. B: Análise cinemática do ponto 2.



**Figura 18.** A: Estereograma representativo para o ponto 3 com o plano que representa a face da vertente. Número de medidas = 11. B: Análise cinemática do ponto 3.



**Figura 19.** Estereograma representativo para o ponto 4 com o plano que representa a face da vertente. Número de medidas = 11. B: Análise cinemática favorável a tombamento de blocos no ponto 4. C: Análise cinemática favorável a deslizamento em cunha no ponto 4.



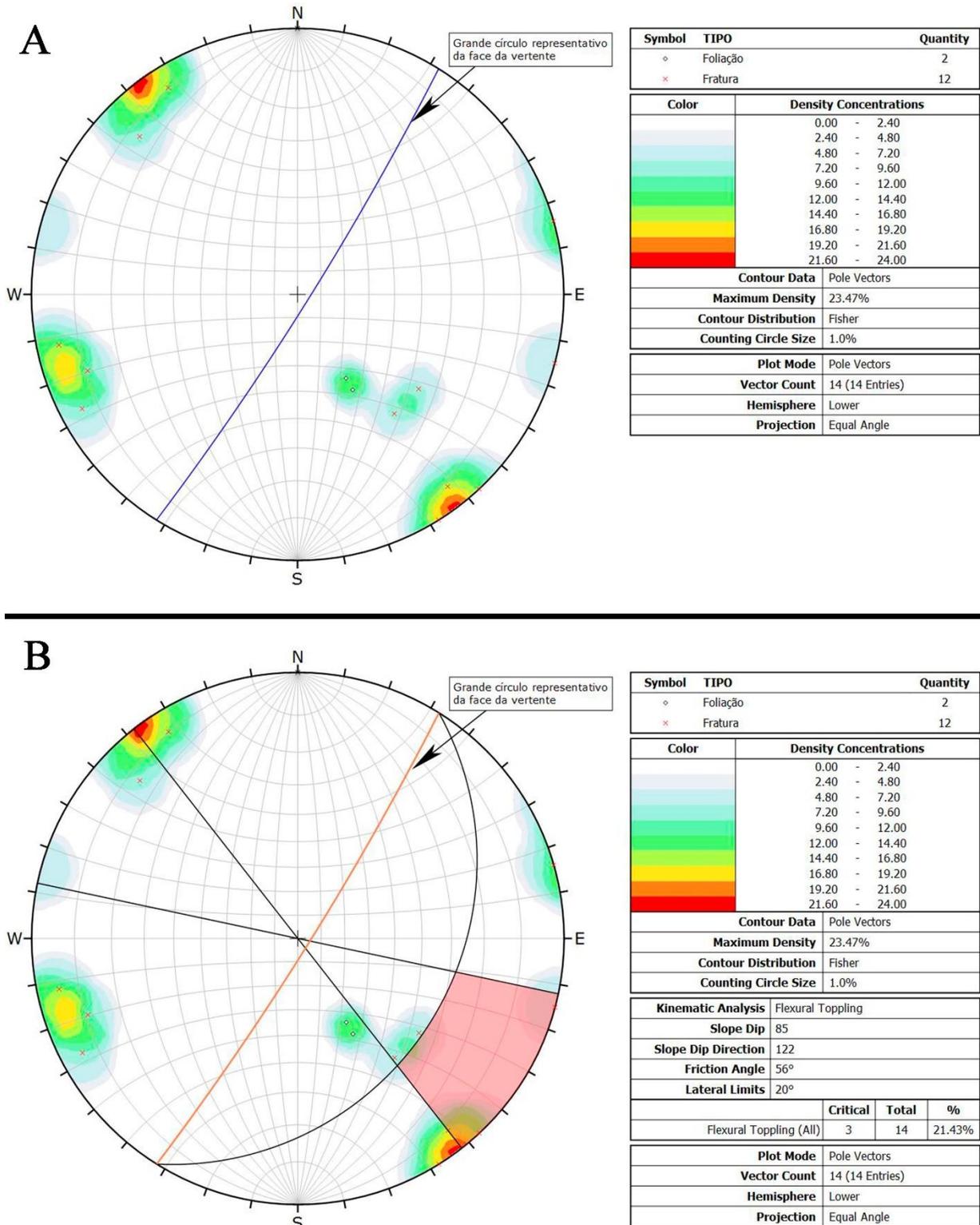
A figura 20A mostra a projeção estereográfica dos polos dos planos de descontinuidades encontrados no ponto 5 e o plano representativo para a face do talude. O talude tem direção NE-SW com alto mergulho para SE. Há adensamento de polos que representam planos com mesma direção do talude, no entanto com mergulho oposto. Essa configuração, como já vista anteriormente, indica potencial para tombamento de blocos. A análise cinemática (Figura 20B) mostra que existem 3 polos dentro da zona crítica de tombamento de blocos nesse talude.

A projeção estereográfica dos polos dos planos de descontinuidades encontrados no ponto 6 e o plano representativo para a face do talude é mostrada na Figura 21A. O talude tem direção NE-SW com alto mergulho para SE. O adensamento de polos indica a presença de pelo menos 3 famílias de fraturas, sendo uma delas responsável pelo risco potencial de tombamento de blocos. A direção principal dessa família, NE-SW, é concordante com a direção do talude, porém com mergulho oposto, configurando o tombamento de blocos (Figura 21B).

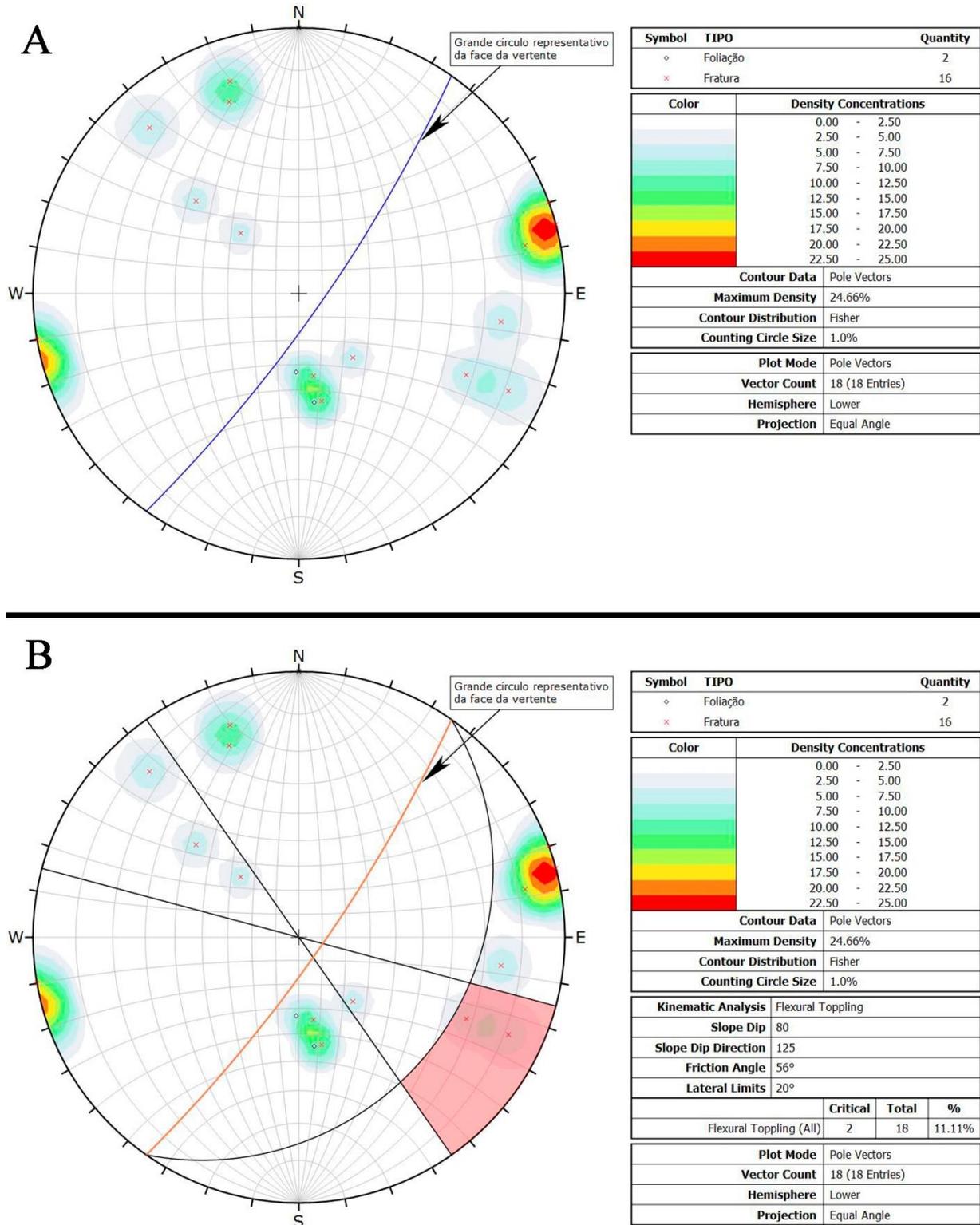
O ponto 7 tem suas medidas estruturais e o plano referente a vertente representadas em projeção estereográfica, como mostra a Figura 22A. O talude tem direção NE-SW e alto mergulho para SE. O estereograma mostra polos dos planos de descontinuidades esparsos e sem padrão. Entretanto, a disposição dos polos no estereograma em relação à face da vertente, indica o potencial risco para tombamento de blocos. A análise cinemática (Figura 22B) mostra que nenhum polo está inserido na zona crítica de colapso. A partir dessas medidas, pode-se afirmar que esse talude está estável em relação à deslizamentos.

As medidas estruturais e a face da vertente referentes ao ponto 8 estão representadas em projeção estereográficas, conforme a Figura 23A. O talude tem direção NE-SW com alto mergulho para SE. A maior frequência de polos indica planos com a mesma direção do talude, NE-SE, mas contendo mergulho oposto, com caimento para NW. O tombamento de blocos é característico para essa configuração entre direção do talude e direção dos planos de descontinuidades. A análise cinemática (Figura 23B) mostra dois polos inseridos na zona crítica de colapso. Esse talude pode ser considerado instável, a partir dessas medidas analisadas.

**Figura 20.** Estereograma representativo para o ponto 5 com o plano que representa a face da vertente. Número de medidas = 14. B: Análise cinemática do ponto 5.

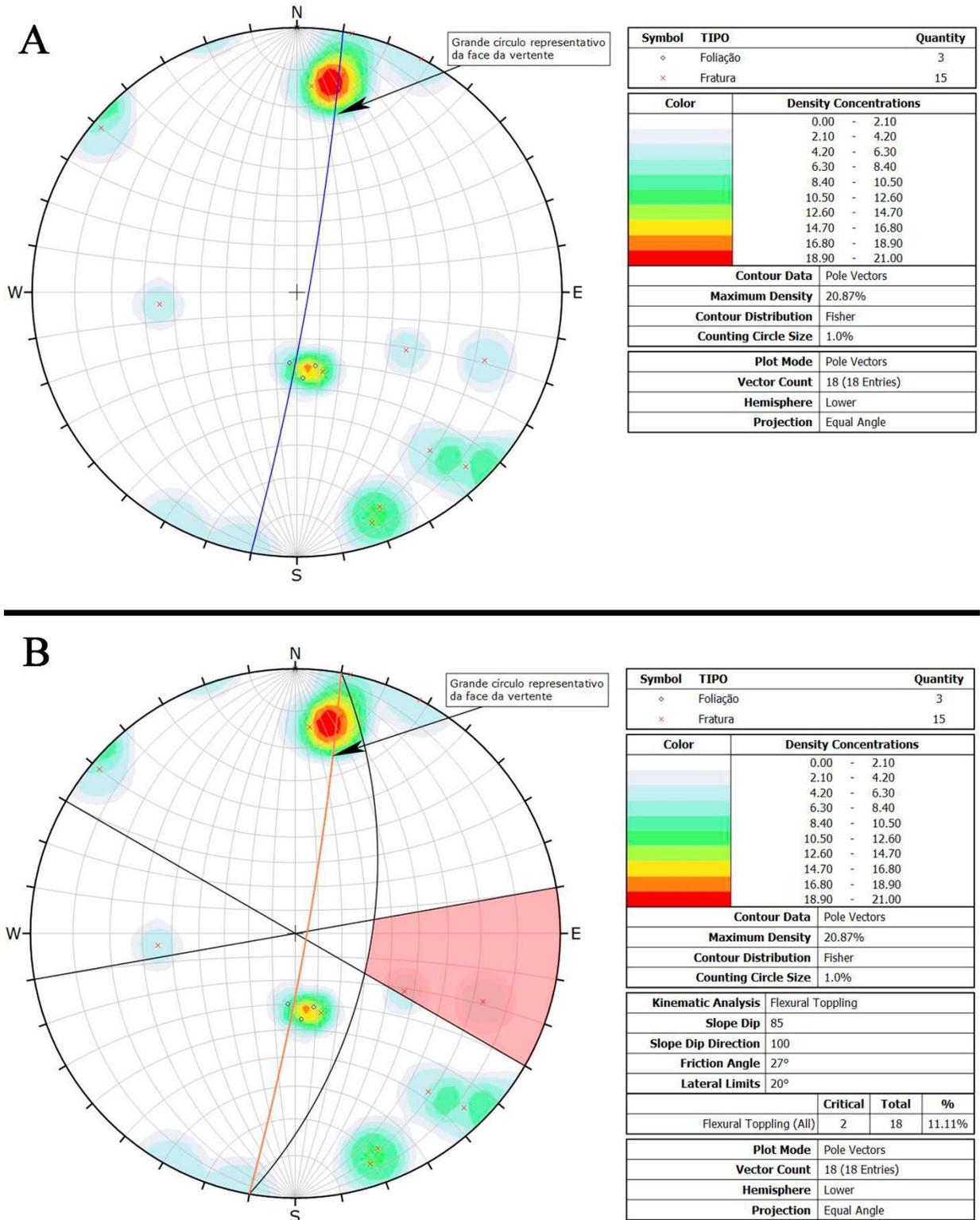


**Figura 21.** Estereograma representativo para o ponto 6 com o plano que representa a face da vertente. Número de medidas = 18. B: Análise cinemática do ponto 6.





**Figura 23.** Estereograma representativo para o ponto 8 com o plano que representa a face da vertente. Número de medidas = 18. B: Análise cinemática do ponto 8.

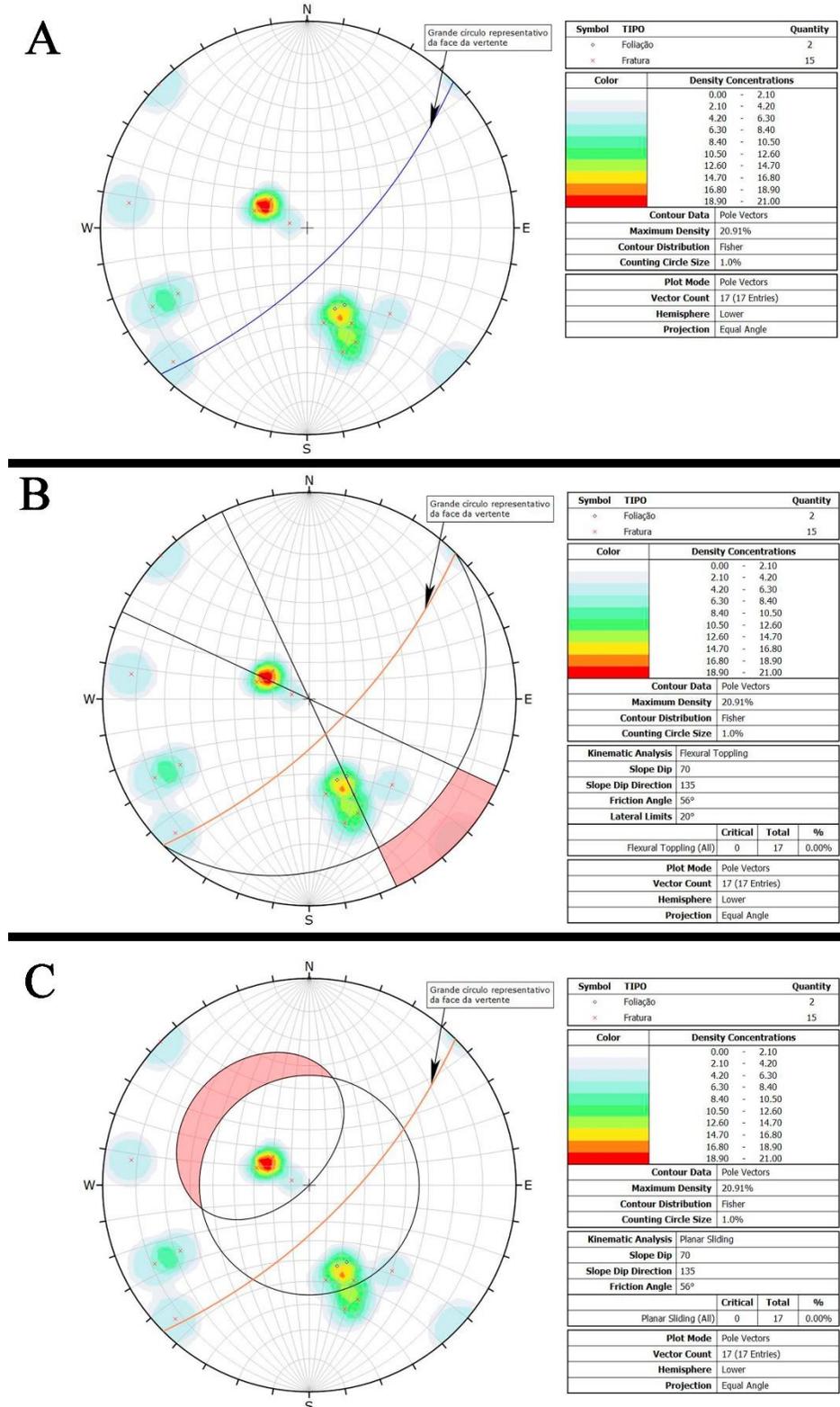


A projeção estereográfica dos polos dos planos de descontinuidades e o plano representativo da face do talude encontrados no ponto 9 é mostrado na Figura 24A. O talude tem direção NE-SW com caimento para SE. Dois adensamentos de polos se destacam no estereograma, ambos com planos indicando direções NE-SW, porém um com caimento para NW e outro para SE. Essas concentrações indicam duas famílias distintas de fratura. A Figura 24B mostra a análise cinemática realizada a partir da família de fraturas que possui caimento para NW, que se refere a tombamento de blocos. No entanto, nenhum polo está indicado na zona crítica, o que significa que não há possibilidades de tombamento de blocos nesse talude, nessas condições. Já a Figura 24C, analisa a outra família, com caimento para SE, que se refere a deslizamento planar. Embora exista a indicação de possível deslizamento, nenhum polo está inserido na zona crítica para deslizamentos planares, o que indica que esse talude está estável nessas condições analisadas.

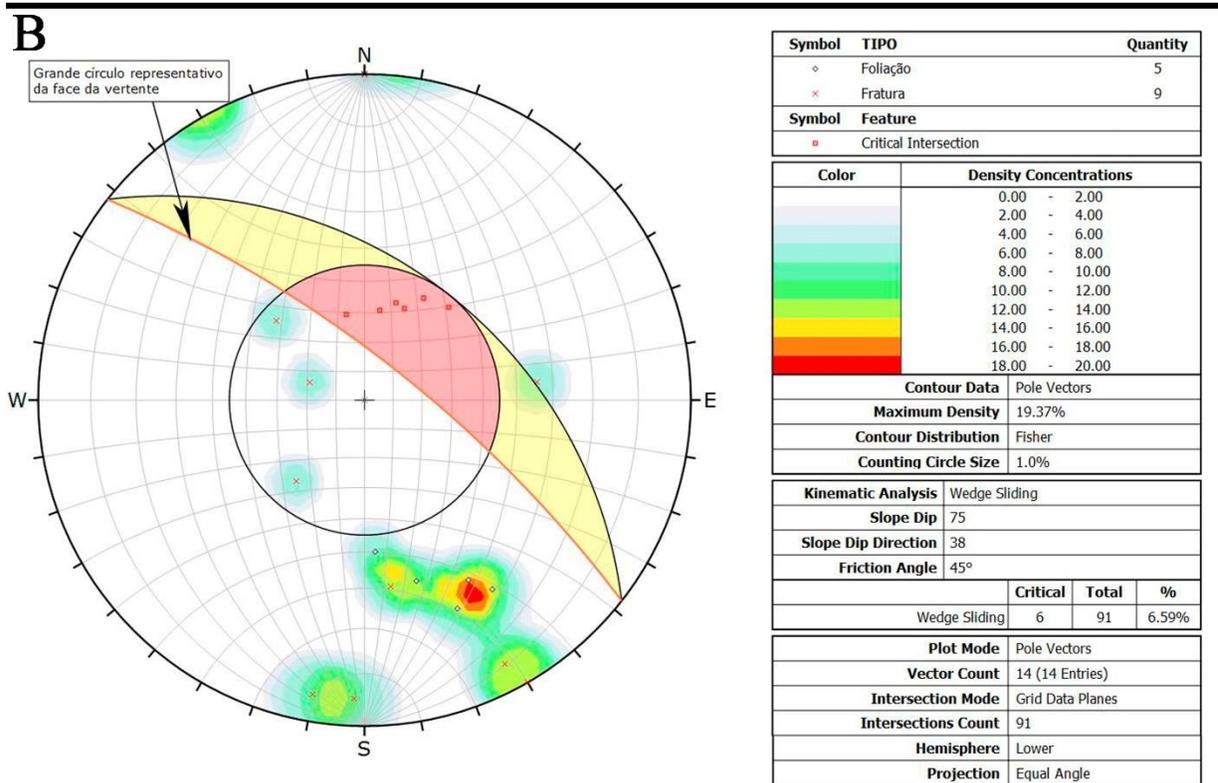
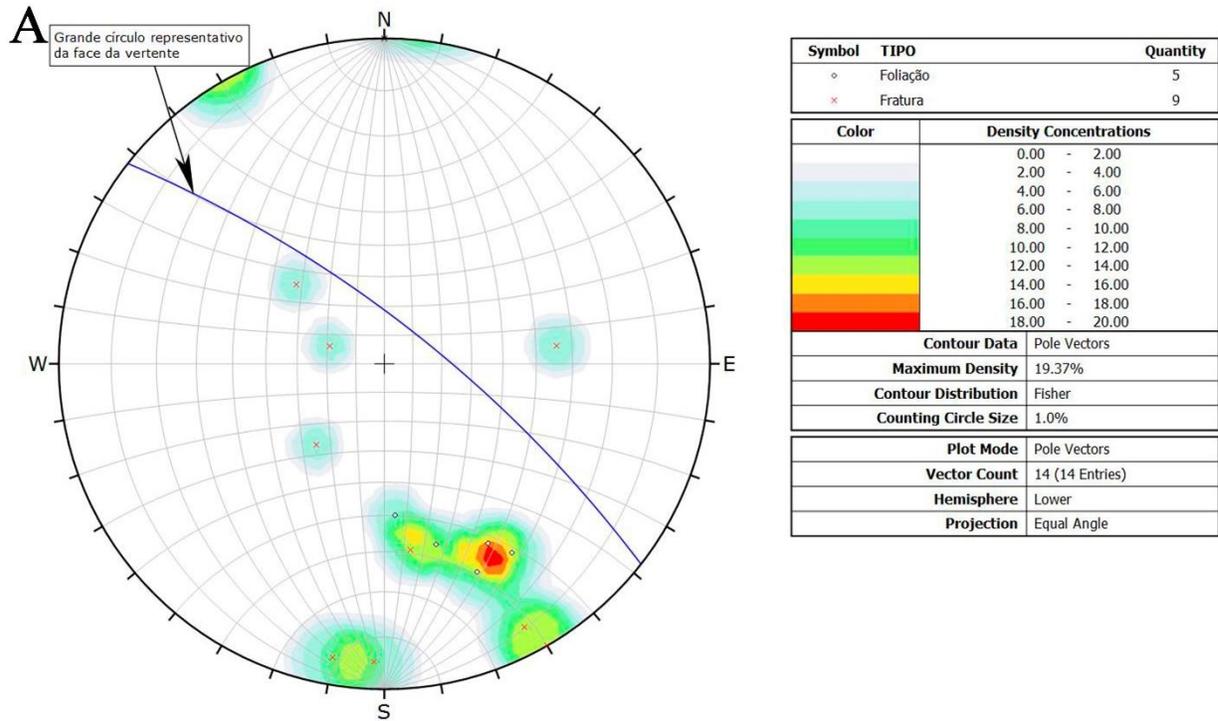
A Figura 25A apresenta a projeção estereográfica dos polos dos planos de descontinuidades e o plano representativo da vertente encontrados no ponto 10. Nesse ponto, o talude tem direção NW-SE com alto caimento para NE. O estereograma mostra que há um adensamento de polos que representam planos com mesma direção e mergulho do talude e outro adensamento com o mesmo rumo do mergulho do talude, mas com direção NE-SW. Essa configuração de duas famílias com diferentes direções e com mesmo sentido do rumo do mergulho é relacionada a deslizamentos em cunha. A análise cinemática (Figura 25B) mostra a cunha de formação entre as duas famílias e os polos de intersecção que estão inseridos na zona crítica. Mesmo apresentando baixa porcentagem de polos que estão na zona crítica (6,59%), esse talude é considerado favorável ao deslizamento em cunha, para esses dados analisados.

O ponto 11 tem suas medidas estruturais representadas em projeção estereográfica, além do plano representativo da face da vertente, como mostra a Figura 26A. Os planos representados pelos polos no estereograma indicam potenciais deslizamento em cunha e deslizamento planar. A Figura 26B mostra a análise cinemática para deslizamento planar e evidencia 7 polos (43,75%) na zona crítica. A análise em cunha (Figura 26C) mostra que um terço dos polos das intersecções (33,33%) estão presentes na zona crítica. Dessa forma, esse talude mostra-se favorável para ambos tipos de deslizamentos.

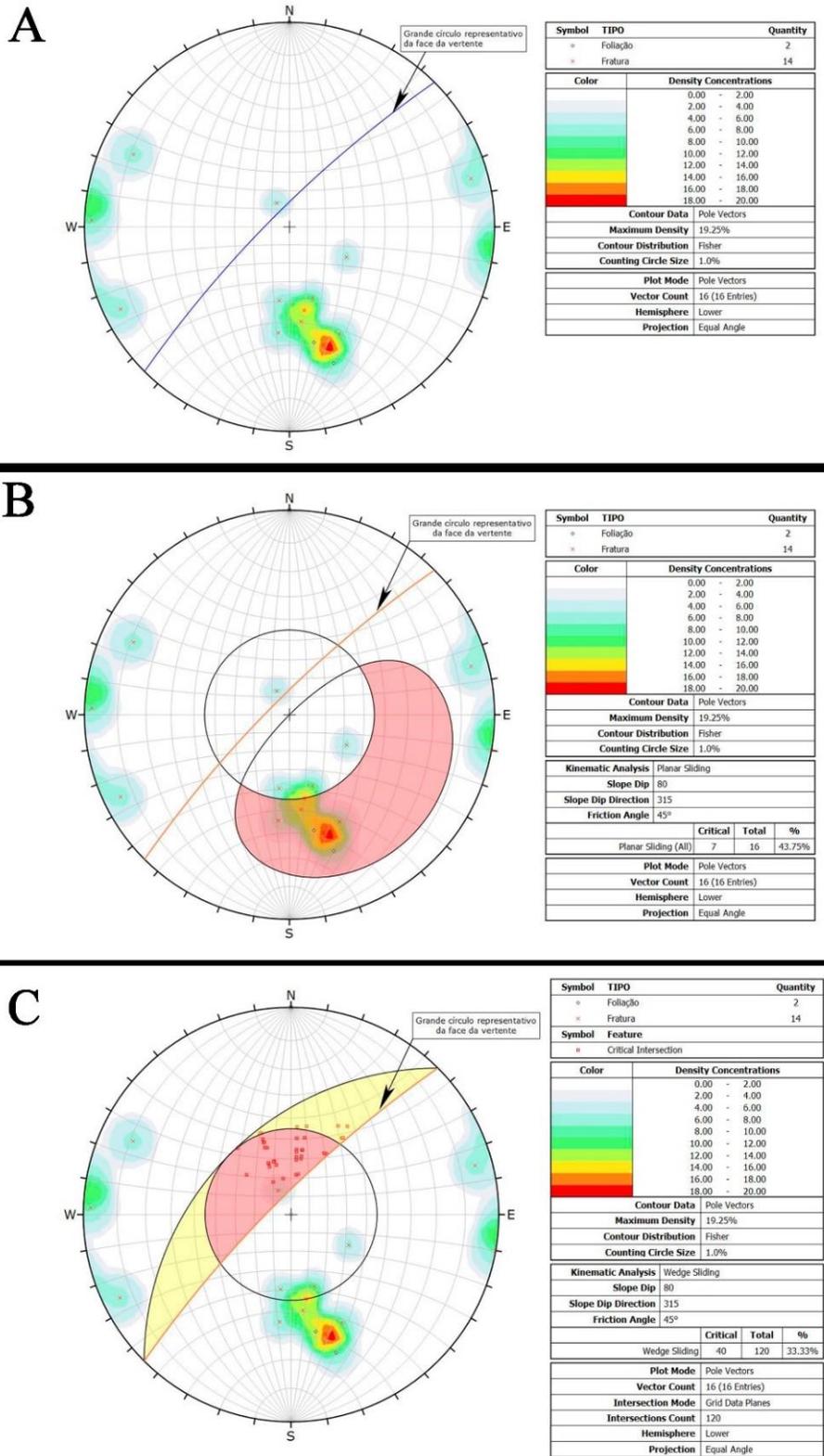
**Figura 24.** Estereograma representativo para o ponto 9 com o plano que representa a face da vertente. Número de medidas = 17. B: Análise cinemática desfavorável a tombamentos de blocos para o ponto 9. C: Análise cinemática favorável a deslizamento planar para o ponto 9.



**Figura 25.** Estereograma representativo para o ponto 10 com o plano que representa a face da vertente. Número de medidas = 14. B: Análise cinemática do ponto 10.



**Figura 26.** Estereograma representativo para o ponto 11 com o plano que representa a face da vertente. Número de medidas = 16. B: Análise cinemática desfavorável a deslizamento planar para o ponto 11. C: Análise cinemática favorável a deslizamento em cunha para o ponto 11.

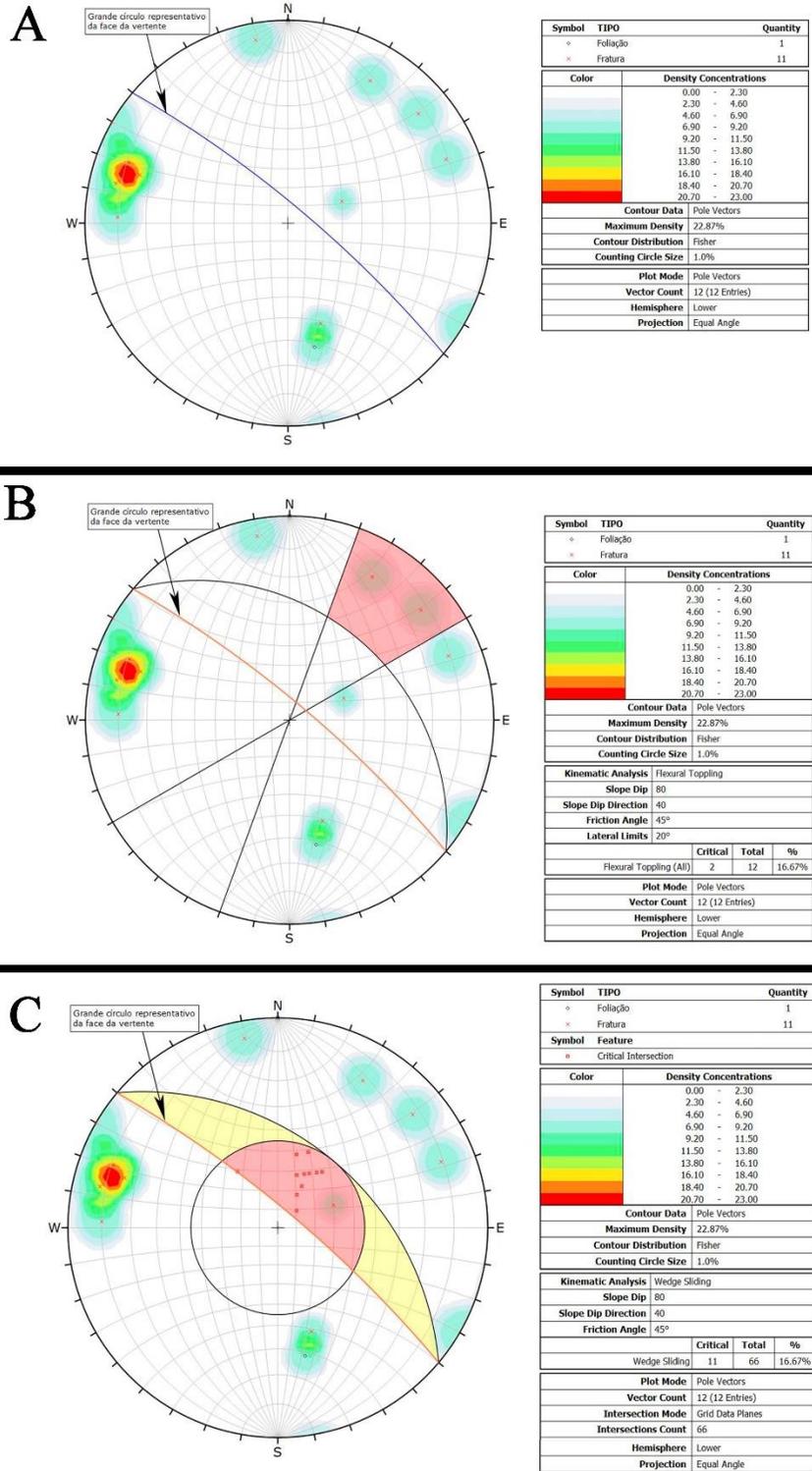


A figura 27A mostra a projeção estereográfica para as medidas de foliação e fratura, além do plano representativo da face do talude, para o ponto 12. A partir do estereograma, é possível prever dois tipos de problemas para esse talude: tombamento de blocos e deslizamento em cunha. A análise cinemática para tombamento de blocos (Figura 27B) mostra planos com direção NW-SE e caimento para SW, sendo apenas dois dentre os 12, como indicados a susceptíveis para ocorrência de tombamento. Já o segundo caso (Figura 27C), mostra a análise para deslizamento em cunha que contem 11 polos de intersecção na zona crítica com direções que variam entre NE-SW com caimento para NW e NE-SW com caimento para SE. O talude mostra-se favorável para colapso, seja em cunha ou tombamento de blocos, para esses dados analisados.

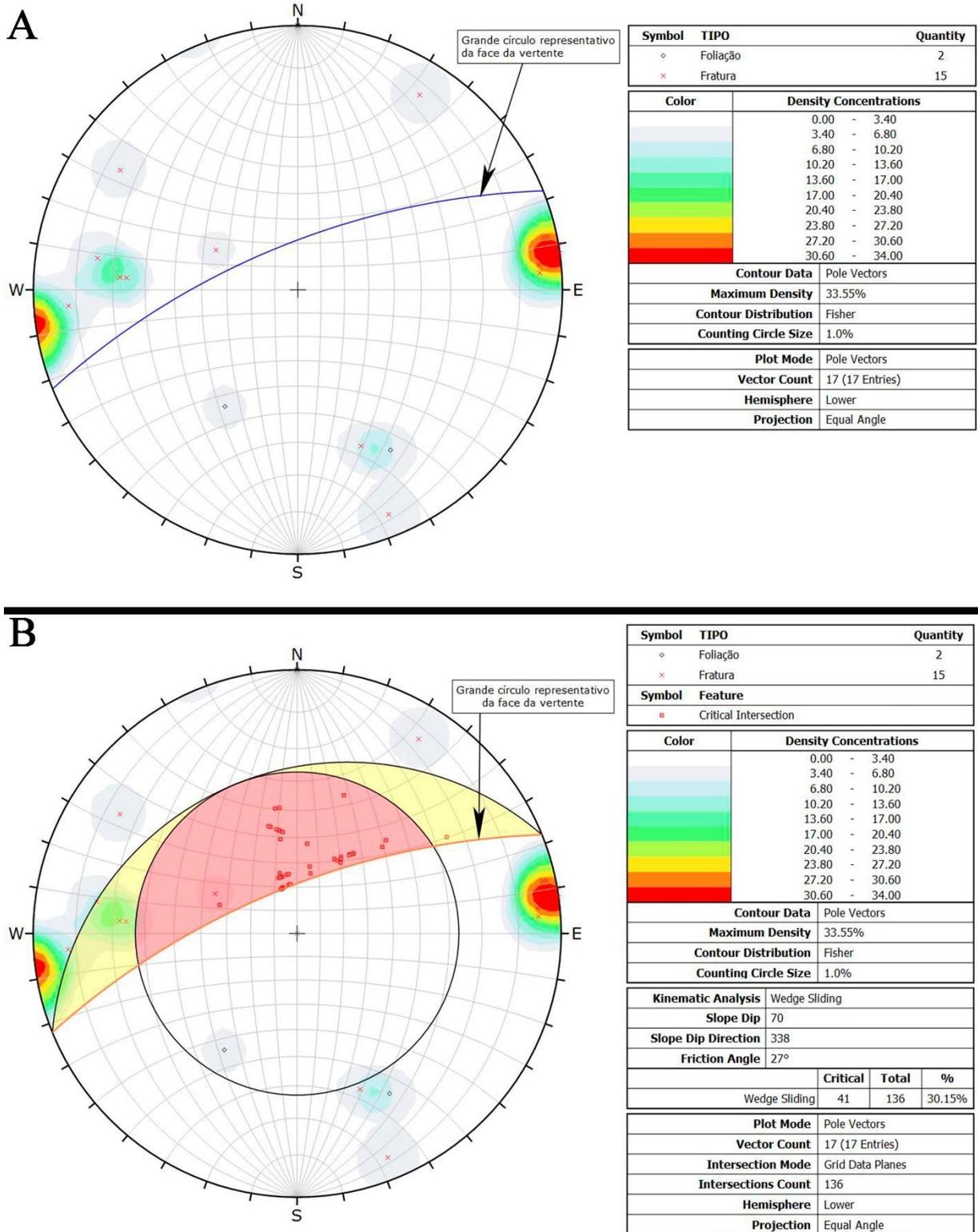
Para o ponto 13, as medidas estruturais foram representadas em projeção estereográfica, além do plano representativo para a face do talude (Figura 28A). A direção da face da vertente é NE-SW com caimento para NW. As duas famílias de fraturas com direções NE-SW e caimento para NW e NW-SE com caimento para NE, se interceptam e formam condições para deslizamentos em cunha, como visto na Figura 28A. Na zona crítica de acidente, há 41 polos de intersecções, o que garante que esse talude é favorável a formação de cunhas.

A projeção estereográfica dos polos dos planos de descontinuidades encontrados no ponto 14 e o plano representativo para a face do talude é mostrada na Figura 29A. Os planos representados pelos polos no estereograma indicam potenciais deslizamento em cunha e deslizamento planar. A Figura 29B mostra a análise cinemática para deslizamento planar e evidencia apenas 1 polo na zona crítica de acidente. A análise em cunha (Figura 29C) mostra que 12 polos, que representam planos que variam de direção entre NW-SE e caimento para NE e NE-SW com caimento para NW, estão presentes na zona crítica. Dessa forma, esse talude mostra-se favorável para ambos tipos de deslizamentos.

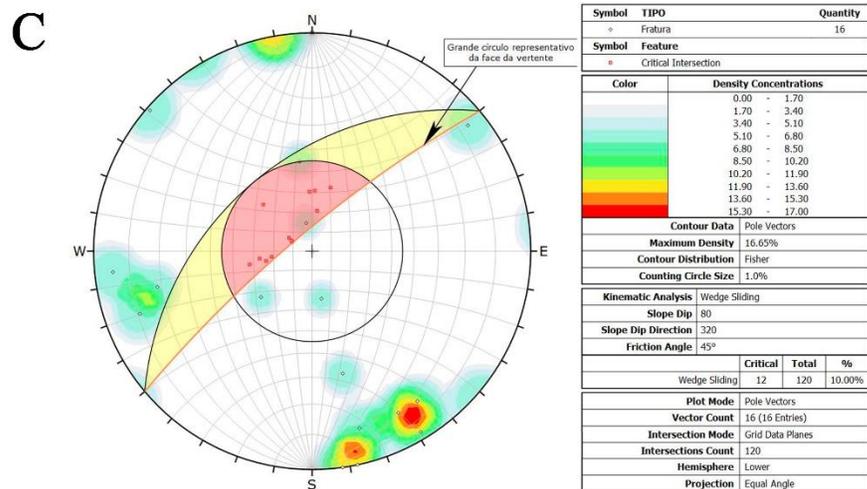
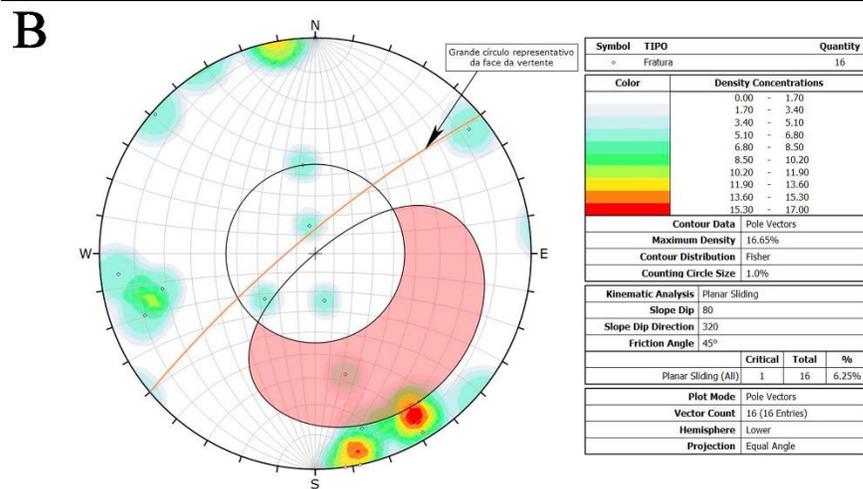
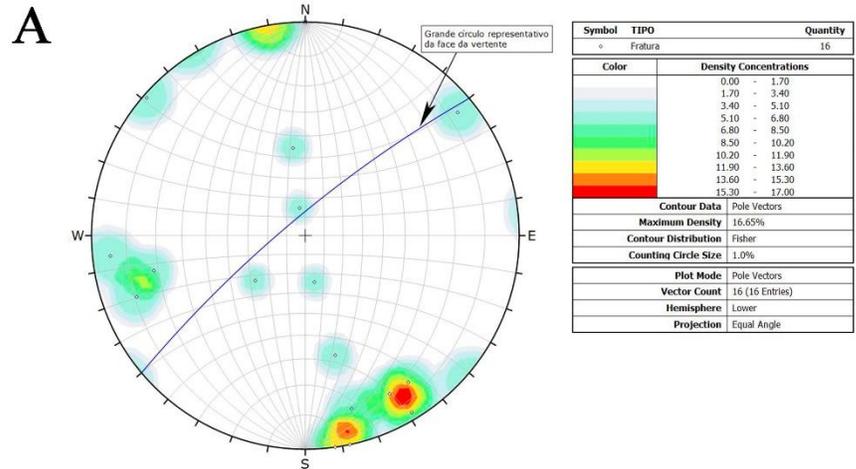
**Figura 27.** Estereograma representativo para o ponto 12 com o plano que representa a face da vertente. Número de medidas = 12. B: Análise cinemática desfavorável a tombamentos de blocos para o ponto 12. C: Análise cinemática favorável a deslizamento em cunha para o ponto 12.



**Figura 28.** Estereograma representativo para o ponto 13 com o plano que representa a face da vertente. Número de medidas = 17. B: Análise cinemática do ponto 13.

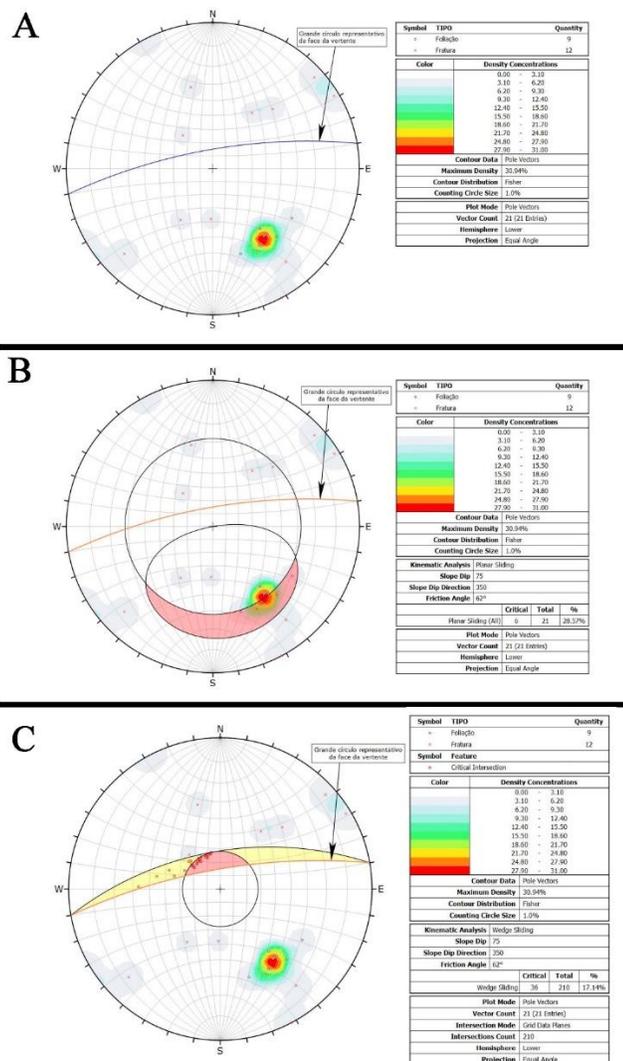


**Figura 29.** Estereograma representativo para o ponto 14 com o plano que representa a face da vertente. Número de medidas = 16. B: Análise cinemática favorável deslizamento planar para o ponto 14. C: Análise cinemática favorável a deslizamento em cunha para o ponto 14.



As medidas estruturais e a face da vertente referentes ao ponto 15 estão representadas em projeção estereográfica, conforme a Figura 30A. O talude tem direção NE-SW com caimento para NW. Dois adensamentos de polos se destacam no estereograma, um com planos indicando direções NE-SW com caimento para NW e outro com direção NW-SE com caimento para SW. Essas concentrações indicam duas famílias distintas de fratura. A análise cinemática realizada a partir da família de fraturas que possui mesma direção e caimento que o talude, indica alto potencial para deslizamentos planares, como é visto na Figura 30B. A análise das duas famílias em conjunto indica deslizamento em cunha (Figura 30C), pois as duas direções se convergem para o caimento no sentido do mergulho do talude.

**Figura 30.** Estereograma representativo para o ponto 15 com o plano que representa a face da vertente. Número de medidas = 21. B: Análise cinemática favorável a deslizamento planar para o ponto 15. C: Análise cinemática favorável a deslizamento em cunha para o ponto 15.



Além das feições estruturais e cinemáticas, o grau de alteração das rochas na região norte é mais elevado, quando comparado à região sul. Esse fato, somado aos problemas de deslizamentos levantados pela análise cinemática, implica em uma área de extrema importância perante a segurança da rodovia. As Figuras 31 e 32 mostram medidas de contenção presentes (telas e gunitagem) no trecho entre os pontos 12 e 13, indicando um local de alta instabilidade que já foi contido. Devido a essas remediações, nesses pontos não foi possível a coleta de dados.

Apesar da região ser propensa a escorregamentos, entre os pontos 10 e 11 foram encontrados taludes com potencial para tombamento de blocos (Figuras 33). A razão é que para haver tombamento de blocos em um ponto, é necessário apenas uma família de fraturas, com caimento contrário às principais, presente no talude.

Os locais onde o grau de alteração era muito alto, no trecho entre os pontos 14 e 15, foi encontrado pequenos deslizamentos de solo e pequenos blocos de rocha (Figura 34). Nesse trecho há necessidade de contenção para barrar os escorregamentos, visto que já adentravam na rodovia causando insegurança ao tráfego rodoviário.

**Figura 31.** Afloramento apresentando tela e gunitagem como medidas de contenção. Entre os pontos 12 e 13.



**Figura 32.** Afloramento apresentando tela e gunitagem como medidas de contenção. Entre os pontos 12 e 13.



**Figura 33.** Afloramentos de muscovita gnaisse com biotita. Blocos caídos ao lado da rodovia. Entre os pontos 10 e 11.



**Figura 34.** Pequenos deslizamentos de solo e blocos de rocha ao lado da rodovia. Entre os pontos 14 e 15.



A Figura 35 destaca o ponto 11, que apresenta favorável situação para deslizamento planar e deslizamento em cunha. Nesse local, o grau de alteração da rocha (Muscovita Gnaiss) é elevado e os blocos estão se auto sustentando.

**Figura 35.** Afloramento de biotita gnaiss com risco de queda de blocos na rodovia. Ponto 11.



## 4.2 Classificações Geomecânicas

Os resultados das características geotécnicas analisadas pelos dois métodos estão apresentados na Quadro 13. Pelo método RMR básico, onde há 5 classes de qualidade de maciço, os resultados alternaram entre classes I e II, representando um maciço muito bom e bom, respectivamente. O Sistema-Q apresenta 9 classes de qualidade de maciço, que vão desde excepcionalmente ruim a excepcionalmente bom. Os resultados mostraram uma alternância entre as classes D, E e F, que representam bom, regular e ruim, respectivamente. O Apêndice II e Apêndice III mostram os mapas de classificação geomecânica segundo os métodos RMR Básico e Sistema – Q, respectivamente.

**Quadro 15.** Classes de qualidade de maciço rochoso segundo RMR Básico e Sistema – Q para o trecho de rodovia estudado.

<i>Ponto</i>	<b>RMR</b>		<b>Sistema - Q</b>	
	<i>Classe</i>	<i>Descrição</i>	<i>Classe</i>	<i>Descrição</i>
1	II	BOM	F	RUIM
2	II	BOM	E	REGULAR
3	II	BOM	E	REGULAR
4	II	BOM	F	RUIM
5	I	MUITO BOM	F	RUIM
6	II	BOM	E	REGULAR
7	I	MUITO BOM	E	REGULAR
8	II	BOM	F	RUIM
9	I	MUITO BOM	D	BOM
10	II	BOM	B	RUIM
11	I	MUITO BOM	E	REGULAR
12	I	MUITO BOM	E	REGULAR
13	II	BOM	E	REGULAR
14	II	BOM	F	RUIM
15	II	BOM	E	REGULAR

De modo a unificar os resultados das classificações geomecânicas para permitir a padronização das notas, uma vez que o RMR usa escala linear e o Sistema – Q escala logarítmica (por isso a grande diferença entre as notas), é possível utilizar correlações em que as notas do Sistema – Q passem para o sistema RMR. Bieniawski (1976), Rutledge e Preston (1978), Moreno (1980), Camaron-Clarke e Budavari (1981), Abad **et al.** (1984) foram os autores que mais tiveram êxito nas suas propostas de correlações entre os sistemas de classificação, de acordo com Goel **et al.** (1996). As respectivas formulas de correlação entre as duas classificações são:

$$\text{Bieniawski (1976)} - RMR = 9\ln Q + 44$$

$$\text{Rutledge e Preston (1978)} - RMR = 5,9\ln Q + 43$$

$$\text{Moreno (1980)} - RMR = 5,4\ln Q + 55,2$$

$$\text{Camaron-Clarke e Budavari (1981)} - RMR = 5\ln Q + 60,8$$

$$\text{Abad **et al.** (1984)} - RMR = 10,5\ln Q + 41,8$$

Apesar dessas correlações apresentarem relativa coerência para a padronização das notas, não mostram um alto índice de certeza, principalmente quando são observados os extremos (muito bom a excepcionalmente bom e fraco a excepcionalmente fraco). Segundo Goel **et al.** (1996), as tentativas de classificação geomecânicas não levam em consideração o fato de esses dois sistemas não serem completamente equivalentes. Exemplo disso é que o sistema RMR não leva em consideração o campo dos esforços a que o maciço está submetido atualmente, enquanto o Q não considera a resistência da rocha como parâmetro independente.

Além disso, o propósito para correlações seria obter dados de um determinado método que não é fornecido, através de um resultado de outro método. Nesse trabalho, foi levantado dados pelos dois métodos ao longo de toda a área, então, a correlação para transformar um em outro, não faz sentido.

### 4.3 Integração dos Resultados

A partir dos resultados obtidos, foi gerado um quadro que permite uma análise comparativa entre os métodos de estimativa da qualidade geotécnica do maciço e apontar os taludes que se comportam de forma estável e instável (Quadro 16).

Os métodos de classificação geomecânica, como visto anteriormente, não apresentaram correlação satisfatória entre si, por motivos de incompatibilidade de pesos dos parâmetros e por cada um focar em uma questão física do maciço, o que acaba por divergir muito as notas. Entretanto, os resultados das classificações foram mantidos na integração para permitir a análise de qual método é melhor aplicado em rodovias. Para contribuir com a crítica sobre as classificações, será também incluído na discussão as informações feitas por observação direta nos locais em que as condições geotécnicas eram muito ruins, ao ponto de apresentarem escorregamentos ou queda de blocos, mas que foram bem ou mediamente bem avaliadas pelos métodos.

Os pontos que apresentaram de maior compatibilidade diante da comparação foram os 7 e 9. De acordo com o quadro, nesses pontos o maciço está pouco fraturado, estável para deslizamentos ou queda de blocos e ambos tiveram notas muito bom e bom pelos métodos RMR e Q, respectivamente. Esses pontos perfazem a parte sul da área (até ponto 10), que já mencionada anteriormente, apresenta grau de alteração menor do que a parte norte (pós ponto 10).

Mesmo a parte sul obtendo altos valores de fraturamento e notas ruins quanto à classificação Q, visualmente essa região aparenta ter melhores condições geotécnicas que a parte norte da área. Além do grau de alteração estar mais baixo nessa região, a razão principal está novamente vinculada a foliação da área, que influencia diretamente no tipo de ruptura que irá ocorrer no talude. O quadro mostra uma tendência para tombamento de blocos, cujo fenômeno é potencializado em casos de taludes verticais ou subverticais, caso contrário, dificilmente ocorrerá problemas. Os taludes estudados no Sul possuem inclinação que varia entre 75 e 85 graus, o que significa que há potencial para queda de blocos. Portanto, essa região não teria problemas e seria estável em relação a fenômenos de instabilidade caso houvesse um planejamento melhor sobre os cortes dos taludes que bordejam a rodovia. As estruturas geológicas que seriam favoráveis ao propósito de segurança

da rodovia, passaram ser desfavoráveis pelo modo de execução da obra. Nesse caso, os taludes deveriam ter sido construídos com angulação mínima para a não ocorrência de queda de blocos.

**Quadro 16.** Integração dos resultados. (\*) locais onde a observação direta de campo confrontou com os resultados obtidos pelas classificações geomecânicas.

<b>Pontos</b>	<b>Domínio</b>	<b>RMR</b>	<b>Sistema-Q</b>	<b>Fraturamento</b>	<b>Cinemática</b>
1	Sul	Bom	Ruim	Muito Fraturado	Deslizamento Planar
2	Sul	Bom	Regular	Muito Fraturado	Tombamento de blocos
3	Sul	Bom	Regular	Medianamente Fraturado	Tombamento de blocos
4	Sul	Bom	Ruim	Pouco Fraturado	Tombamento de blocos e Deslizamento em cunha
5	Sul	Muito bom	Ruim	Medianamente Fraturado	Tombamento de blocos
6	Sul	Bom	Regular	Medianamente Fraturado	Tombamento de blocos
7	Sul	Muito bom	Bom	Pouco Fraturado	Estável
8	Sul	Bom	Ruim	Medianamente Fraturado	Tombamento de blocos
9	Sul	Muito bom	Bom	Pouco Fraturado	Estável
10	Norte	Bom	Ruim	Medianamente Fraturado	Deslizamento em cunha
11	Norte	Muito bom	Regular	Medianamente Fraturado	Deslizamento planar e Deslizamento em cunha
12	Norte	Muito bom	Regular	Pouco Fraturado	Tombamento de blocos e Deslizamento em cunha
13	Norte	Bom	Regular	Pouco Fraturado	Deslizamento em cunha
14	Norte	Bom	Ruim	Medianamente Fraturado	Deslizamento planar e Deslizamento em cunha
15	Norte	Bom	Regular	Medianamente Fraturado	Deslizamento planar e Deslizamento em cunha

Na área Norte, onde a foliação é favorável ao mergulho do talude, locais em potencial para deslizamento são frequentes, segundo o Quadro 16. Somado a esse fato, a observação direta dos taludes confronta diretamente com os resultados apontados pelas classificações. Nesses pontos, há a existência de queda de blocos, deslizamentos de solo e rocha, além do grau de alteração elevado. Portanto, mesmo com notas como Muito bom, Bom e Regular, de ambos os métodos, para esses pontos não se deve excluir os propósitos do grau de alteração e as análises cinemáticas, atribuindo-se a esses resultados, pesos com maior importância perante as classificações.

## 5. CONCLUSÕES

A partir do estudo feito em conjunto das classificações geomecânicas (RMR e Q), do grau de fraturamento do maciço e das análises cinemáticas, para o trecho da Rodovia Governador Mário Covas (Km 115 – Km 121), é possível determinar pontos de importância e suas referidas propostas de solução.

Os taludes da região sul da área estudo foram mal projetados ou mal executados quando construídos. A inclinação é favorável ao tombamento de blocos e a disposição da foliação potencializa esse problema. Nesses pontos, há a necessidade de urgência para a aplicação de medidas preventivas e de contenção. Para taludes com baixo e médio risco de queda de blocos, as medidas indicadas seriam cortinas de encaminhamento e barreiras flexíveis, que impedem o desprendimento de blocos e barreiras de tela de aço para conter rolamento de blocos soltos. Para locais com alto risco, é indicado as cortinas atirantadas que consistem em um muro de concreto somado a ancoragem de tirantes de aço.

A região norte é penalizada com a direção da foliação do maciço, que em geral, concorda com o caimento dos taludes nessa parte da área. Dessa forma, os problemas que já eram esperados como escorregamentos, tanto planar como em cunha, é agravado pelo estado de alteração das rochas. Dessa forma, os pontos que apresentam deslizamento de solo e rocha, deveriam já possuir contenção por estar próximo à rodovia e fornecer risco ao tráfego. Medidas de contenção como solo grampeado ou **Soil Nailing** que estabilizam a encosta através de barras de aço instaladas no solo seguido por injeção de nata de cimento, finalizado com concreto projetado para garantir a proteção do terreno. Outra solução é a construção de muros de arrimo para conter o escorregamento e barrar a entrada de materiais na rodovia. Para os pontos com potencial risco de deslizamento planar e em cunha, a aplicação de cortina atirantada seria uma solução para evitar acidentes.

Na fase de projeto da construção de obras de grande porte, como rodovias, deve ser salientado quais locais por onde a rodovia será construída que oferecem riscos e quais seus tipos. Dessa forma, é possível analisar os custos operacionais de fazer um trajeto em uma região onde

seriam necessários muitos meios de contenção ou que, no futuro, seriam áreas em potencial para problemas de instabilidade de talude. A falta de estudo ou a negligência na fase de execução pode levar a empresa ou o estado a gastar mais em obras de recuperação, do que pequenas intervenções feitas premeditadamente ou por monitoramento posterior.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de uma investigação mais ampla, na qual seria ideal abranger todo o maciço e não se limitasse aos contornos da rodovia. A ampliação da área de estudo, nesse caso, permite a compreensão plena sobre, não só os taludes escavados, mas também os taludes naturais, que possuem grande importância na região da Serra do Mar e necessitam de estudos que auxiliam na prevenção de acidentes. Outro ponto favorável para futuras pesquisas é a maior precisão na coleta de dados das classificações geomecânicas. Para isso, por exemplo, pode-se utilizar o Esclerômetro (**Schmidt Hammer**) que é muito usado para a estimar a resistência à compressão uniaxial da rocha.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAD, J., CALEDA, B., CHACON, E., GUTIERREZ, V., HIDALGO, E. Application of Geomechanical Classification to Predict the Convergence of Coal Mine Galleries and to Design their Supports. In: **5<sup>th</sup> int. Congr. Rock Mech.**, Melbourne, p. 15-19, 1984.

ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y. O embasamento da Plataforma Sul Americana. In: \_\_\_\_\_. **O Precambriano do Brasil**. São Paulo: Edgard Blucher, 1984. p. 1-5.

BARTON, N., LIEN, R., LUND, J. Engineering Classification of Rock Masses for Design of Tunnel Support. **Rock Mechanics**, n. 6, p. 189-236, 1974.

BIENIAWSKI, Z.T. Engineering classification of jointed rock masses. **Trans. S. African Instn. Civ. Engrs.**, África do Sul, Vol. 15, N. 12, p. 335-344, Dec. 1973.

BIENIAWSKI, Z. T. Rock mass classification in rock engineering. In: **Exploration for rock engineering, proc. of the symp.**, (Ed. Z. T. Bieniawski) Cape Town: Balkema, n.1, p. 97-106, 1976.

BIENIAWSKI, Z. T. **Engineering rock mass classifications**: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. John Wiley & Sons, 1989.

CAMERON-CLARKE, I. S., BUDAVARI, S. Correlation of Rock Mass Classification Parameters Obtained from Borecore and In-Situ Observations. **Engng Geol.**, v.17, p. 19-53, 1981.

CAMPANHA, G. A., ENS, H. H., PONÇANO, E. W. L. Análise morfotectônica do Planalto do Juqueriquerê, São Sebastião (SP). **Brazilian Journal of Geology**, São Paulo, vol.24, n.1, p. 32-42. 1994.

CARVALHO, P. A. S. **Manual de geotecnia**: Taludes de rodovias: orientação para diagnóstico e soluções de seus problemas. Departamento de Estradas e Rodagens do Estado de São Paulo, Instituto de Pesquisa Tecnológicas. São Paulo, 1991. 388 p.

CHIEREGATI, L., THEODOROVICZ, A. M. G., THEODOROVICZ, A, MENEZES, R. G., CHIODI FILHO, C., RAMALHO, R. **Projeto folhas natividade da Serra e Caraguatatuba: relatório final.** CPRM, 1982.

DEERE, D. The rock quality designation (RQD) index in practice. In: **Rock classification systems for engineering purposes.** ASTM International, 1988.

EBERT, H. D., HASUI, Y. Transpressional tectonics and strain partitioning during oblique collision between three plates in the Precambrian of southeast Brazil. **Geological Society, London, Special Publications**, v. 135, n. 1, p. 231-252, 1998.

FIORI, A. P., CARMIGNANI, L., **Fundamentos de mecânica de solos e das rochas**, 2nd ed. UFPR, Paraná, Brasil, p. 602, 2009.

GOEL, R. K., JETHWA, J. L., DHAR, B. B. Effect of tunnel size on support pressure. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech.** Abstr. Vol.33 n.7, p. 749-755, 1996.

GOODMAN, R. E., **Introduction to rock mechanics.** New York: Wiley, 1989.

HASUI, Y. **Geologia da região administrativa 3 (Vale do Paraíba) e parte da região administrativa 2 (Litoral) do estado de São Paulo.** São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1978. 1 mapa, color. Escala 1: 200,000.

HASUI, Y. A Grande Colisão Pré-Cambriana do Sudeste Brasileiro e a Estruturação Regional. **Geociências**, São Paulo, v. 29, n. 2, p. 141-169, 2010.

HASUI, Y., CARNEIRO, C. D. R., ALMEIDA, F. d., BARTORELLI, A. **Geologia do Brasil.** São Paulo: Oficina de textos, 2012.

HASUI, Y., OLIVEIRA, M. D. Província Mantiqueira–Setor Central. **O Pré-cambriano do Brasil**, p. 308-344, 1984

HEILBRON, M., PEDROSA-SOARES, A. C., CAMPOS NETO, M. d. C., SILVA, L. d., TROUW, R. A. J., JANASI, V. d. A., MANTESSO-NETO, V., BARTORELLI, A., CARNEIRO, C., BRITO-NEVES, B. Província Mantiqueira. In: MANTESSO-NETO, V. BARTORELLI, A., CARNEIRO, C., BRITO-NEVES, B. B. (Org.). **Geologia do continente sul-americano**: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo: Beca, 2004. P. 203–235.

HOEK, E., BRAY, J., D., **Rock slope engineering**. CRC Press, 1981.

HOEK, E., KAISER, P.K., BAWDEN, W.F. **Support of underground excavations in hard rock**. Rotterdam: Balkema, 1995. 215p.

HUDSON, A., HARRISON, J. P., **Engineering Rock Mechanics – An Introduction to the Principles**. Pergamon, London. 1997.

LADEIRA, F.L. **Curso de Mecânica das Rochas**. Universidade Federal de Ouro Preto, 1981. 91p.

MASSAD, F. **Obras de Terra**: curso básico de geotecnia. Ed. Oficina de Textos, São Paulo, 2003.

MATTOS, K. C. A. **Processo de instabilização em taludes rodoviários em solos residuais arenosos**: Estudo na rodovia Castello Branco (SP-280), Km 305 a 313. 126f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – USP, São Carlos, 2009.

MORENO, T. E. **Aplicación de las Clasificaciones Geomecánicas a los Túneles de Pajares**. // Curso de Sostenimientos Activos en Galerías y Túneles. Fundación Gomez-Parto, Madrid, 1980.

PALMSTROM, A. **The volumetric joint count** – a useful and simple measure of the degree of jointing. Proc. IV Int. Congr. IAEG, New Delhi, 1982. p. 221-228.

RITTER, W. **Die Statik der Tunnelgewölbe**. Berlin: Springer, 1989.

ROCKSCIENCE. **Dips Users Manual**, Rocscience Inc., Canada. (2010)

RUTLEDGE, J. C., PRESTON, R. L. Experience with Engineering Classifications of Rock. **Proc. Int. Tunnelling Syrup.**, Tokyo, n.3, p. 1-7, 1978.

SILVA, P. C. F., MAFFRA, C. Q. T., TOMINAGA, L. K. **Projeto Carta de Risco a Movimentos de Massa e Inundação no Município de São Sebastião**. São Paulo: Instituto Geológico, 1996, color, Escala 1:50,000.

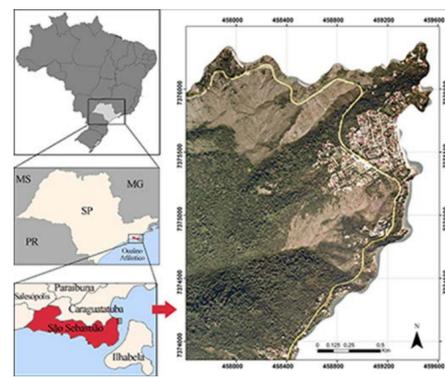
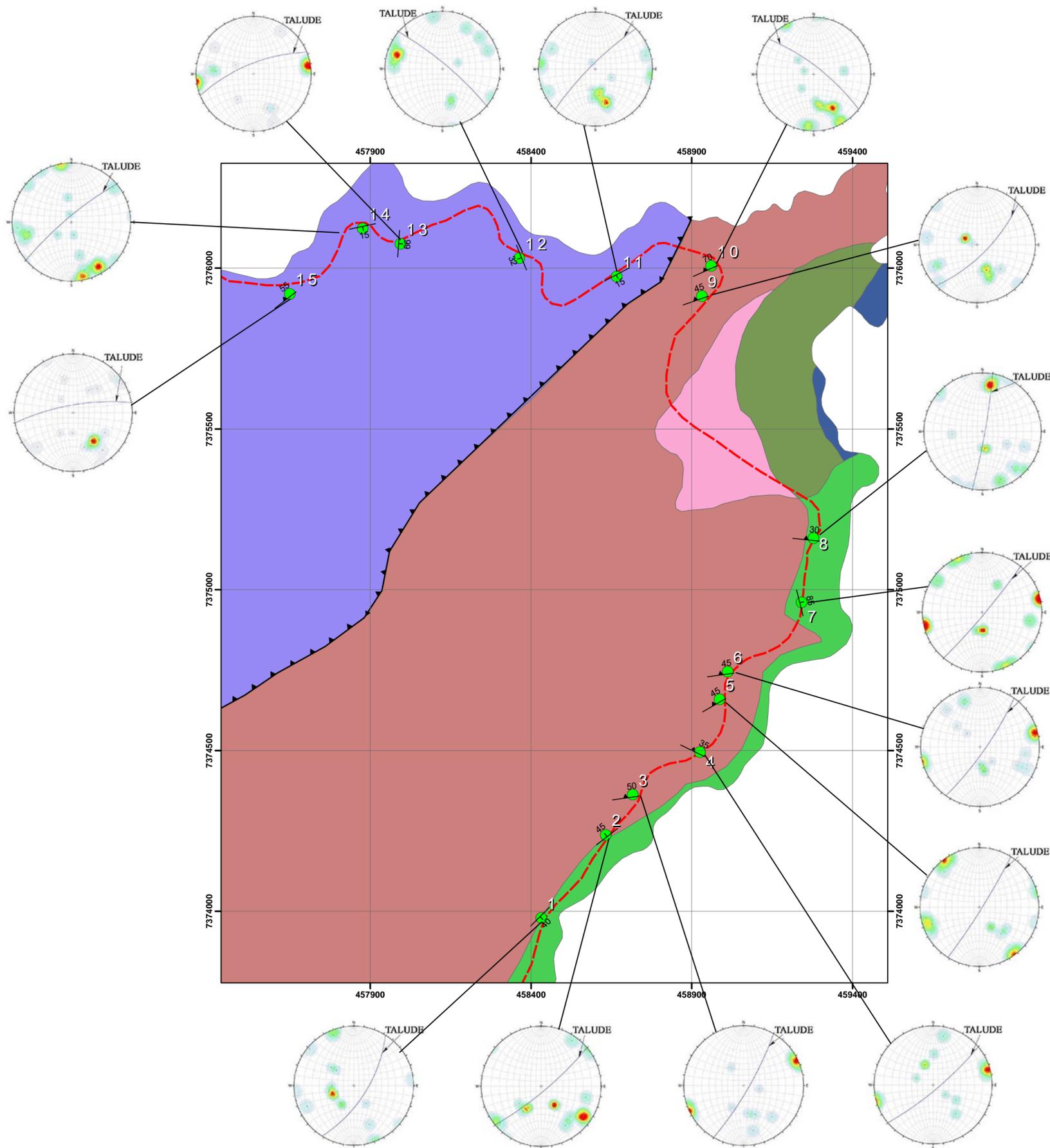
SILVA, R. F. **Análise de magnitude e frequência espacial de movimentos de massa em Caraguatatuba-SP**. 2013. Dissertação (Mestrado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

SINGH, B., GOEL, R. K. **Rock mass classification: a practical approach in civil engineering**. Vol. 46. Elsevier, 1999.

TERZAGHI, K. Introduction to tunnel geology. **Rock tunnelling with steel supports**, p. 17-99, 1946.

WICKHAM, G.E., TIEDEMANN, H.R., SKINNER, E.H. Support determination based on geologic predictions. In **Proc. North American Rapid Excav. Tunneling Conf.**, 1972, Chicago, 43-64. New York: Soc. Min. Engrs, Am. Inst. Min. Metall. Petrolm Engrs, 1972.

# Apêndice I



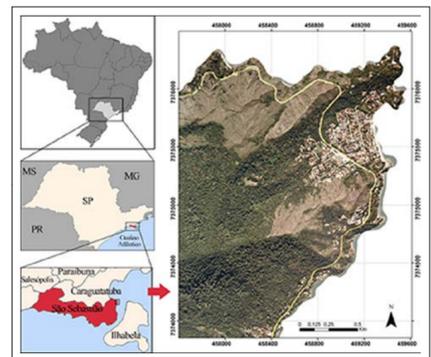
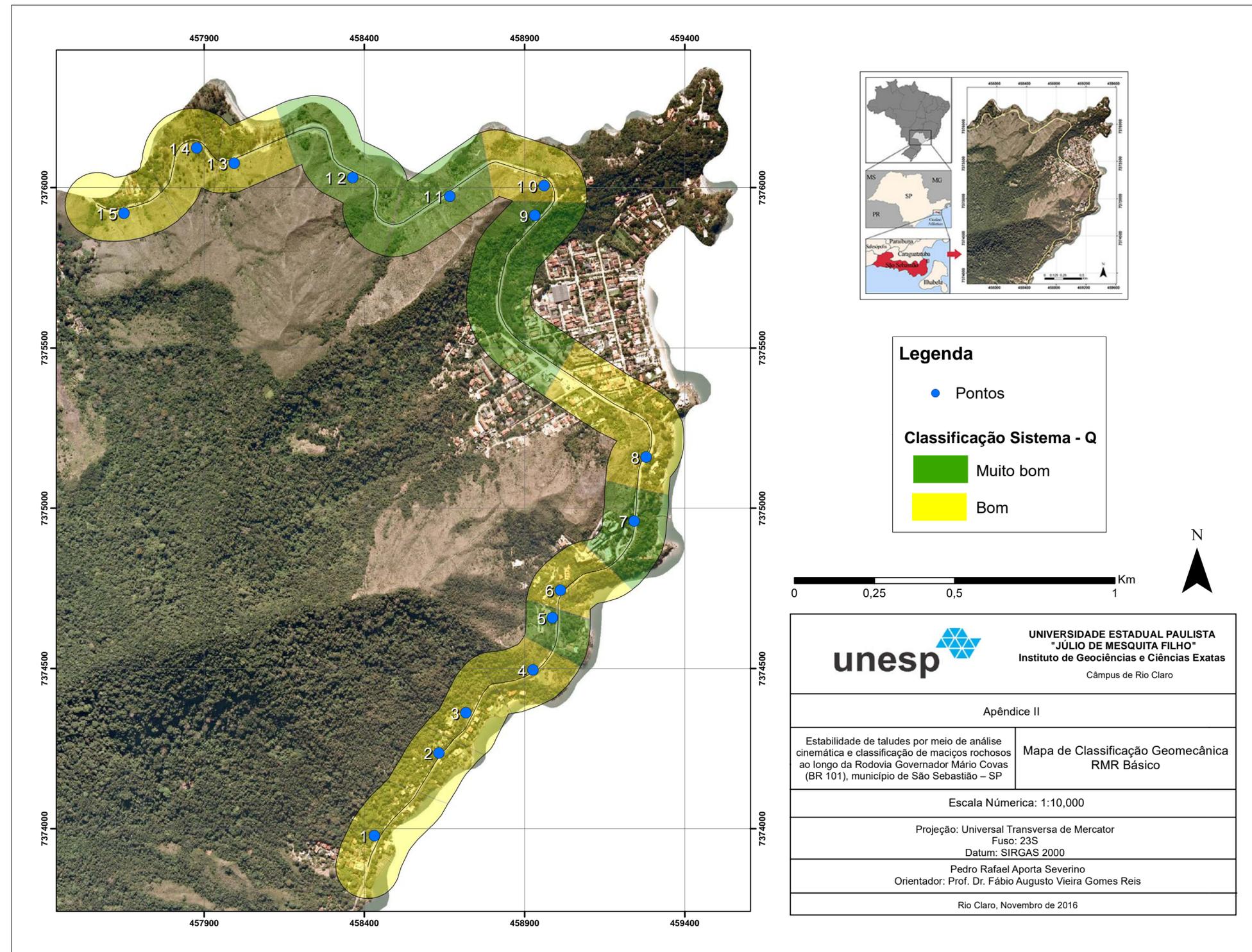
**Legenda**

- Depósitos arenosos francamente marinhos subatuais, incluindo antigos terraços (idade pleistocênica e holocênica)
- Depósitos de ambiente fluvial incluindo aluviões e planícies fluviais atuais e sub-recentes
- Sedimentos coluviais
- Areias quartzosas, siltes e argilas de deposição marinhav
- Areias de deposição praial
- Biotita Gnaiss com granada passando a migmatitos predominantemente estromatolíticos (bandados) com paleossoma biotítico, xistoso ou gnaissico. Localmente atinge termos nebulíticos.
- Migmatitos com estruturas variadas, textura predominantemente grossa, atingindo termos porfiríides, nebulíticos e homofânicos. Presença de granada no leucossoma. Alguns níveis de anfibolitos intercalados.
- Falha de empurrão
- Fratura
- Foliação
- Rodovia Gov. Mário Covas
- Pontos
- Estereograma representativo do talude e das estruturas planares presentes no ponto



<b>UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA</b> <b>"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"</b> Instituto de Geociências e Ciências Exatas Câmpus de Rio Claro	
Apêndice I	
Estabilidade de taludes por meio de análise cinemática e classificação de maciços rochosos ao longo da Rodovia Governador Mário Covas (BR 101), município de São Sebastião – SP	<b>Mapa de pontos com estereogramas dos taludes</b>
Escala Numérica: 1:10,000	
Projeção: Universal Transversa de Mercator Fuso: 23S Datum: SIRGAS 2000	
Pedro Rafael Aporta Severino Orientador: Prof. Dr. Fábio Augusto Vieira Gomes Reis	
Rio Claro, Novembro de 2016	

## Apêndice II

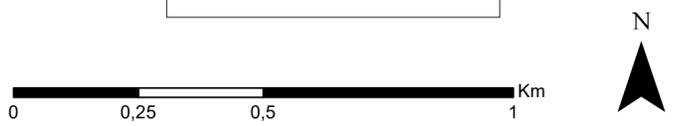


**Legenda**

- Pontos

**Classificação Sistema - Q**

- Muito bom
- Bom



 <b>UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA</b> <b>"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"</b> Instituto de Geociências e Ciências Exatas Câmpus de Rio Claro	
Apêndice II	
Estabilidade de taludes por meio de análise cinemática e classificação de maciços rochosos ao longo da Rodovia Governador Mário Covas (BR 101), município de São Sebastião – SP	<b>Mapa de Classificação Geomecânica RMR Básico</b>
Escala Numérica: 1:10,000	
Projeção: Universal Transversa de Mercator Fuso: 23S Datum: SIRGAS 2000	
Pedro Rafael Aporta Severino Orientador: Prof. Dr. Fábio Augusto Vieira Gomes Reis	
Rio Claro, Novembro de 2016	

## Apêndice III

