

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

**COMPARAÇÃO ENTRE OS SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO SMR E SSPC EM
UM TALUDE DE SILTITO BRANDO DA BACIA DO ITAJAÍ EM GASPAR - SC**

Vinícius Freire Hickel

Trabalho de Conclusão de Curso submetido a banca examinadora para a obtenção do Grau de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Murilo da Silva Espíndola

Coorientador: Prof. Dr. Fernando Jaques Althoff

Florianópolis

2020

Ficha de identificação da obra

Hickel, Vinicius Freire

Comparação entre os sistemas de classificação SMR e SSPC em um talude de siltito brando da Bacia do Itajaí em Gaspar - SC / Vinicius Freire Hickel ; orientador, Murilo da Silva Espíndola, coorientador, Fernando Jacques Althoff, 2020.
90 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de
Filosofia e Ciências Humanas, Graduação em Geologia,
Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Geologia. 2. Estabilidade de taludes. 3. Análise cinemática. 4. Classificação SMR. 5. Classificação SSPC. I. Espíndola, Murilo da Silva. II. Althoff, Fernando Jacques. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Geologia. IV. Título.

Vinicius Freire Hickel

**CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL E ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE UM
TALUDE DE SILTITO BRANDO EM GASPAR - SC**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Geologia, e aprovado em sua forma final pelo Coordenador do Curso de Geologia.

Florianópolis, 20 de julho de 2020.



Documento assinado digitalmente
Neivaldo Araujo de Castro
Data: 27/07/2020 20:01:54-0300
CPF: 733.324.459-87

Prof. Neivaldo Araujo de Castro, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente
Murilo da Silva Espíndola
Data: 27/07/2020 15:52:54-0300
CPF: 056.661.899-05

Prof. Murilo da Silva Espíndola, Dr.
Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente
Juan Antonio Altamirano Flores
Data: 29/07/2020 13:50:59-0300
CPF: 346.029.847-20

Prof. Juan Antonio Altamirano Flores, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina



Assinado de forma digital
por Rodman Raúl Córdova
Rodríguez
Dados: 2020.07.29 21:00:07
-03'00'

Rodman Raúl Córdova Rodríguez, MSc.
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Este trabalho é dedicado aos anônimos contribuintes brasileiros que o financiaram.

AGRADECIMENTOS

Se fosse para ser justo (e rigoroso na minha justiça), esta nota de agradecimentos ficaria muito mais longa que o recomendado. Não porque o fim de uma graduação seja algo especial (é um momento como qualquer outro), mas porque todo momento merece agradecimentos impublicáveis e inarticuláveis devido a sua extensão. É necessário escolher momentos para agradecer, em escolhas relativamente arbitrárias – mas ritos de passagem importam.

Dito isso, agradeço a meus pais, sem seu apoio nada disso seria possível. Agradeço aos meus irmãos Arthur e Antônio, que conviveram comigo por boa parte da minha jornada em Florianópolis. À minha irmã Thalita e família, que me acolheram em Minas Gerais durante o estágio. Agradeço à minha parceira Luciana, que esteve ao meu lado em quarentena, enquanto redigi boa parte deste TCC – e que está ao meu lado enquanto escrevo isto.

Agradeço ao meu orientador, Murilo, pela contribuição na minha formação e por tudo que faz pelos alunos e pelo curso. Ao meu coorientador, Fernando, pelo rigor nas correções e pelas aulas com seu humor bastante próprio. Ao Vilson, técnico administrativo do curso, pela disposição e parceria em ajudar nos problemas burocráticos.

Agradeço aos meus amigos de curso, sem eles todos os anos na UFSC não teriam sido tão brilhantes. Agradeço ao amigo e irmão de outra pátria, Humberto, pela confecção da lâmina delgada e por ter conseguido me enviar fotos dela a tempo de inseri-las aqui. Agradeço ao Wellington, por toda a ajuda no dia de campo desse trabalho, e principalmente pelo bom humor e companheirismo. Agradeço à Beatriz, pelo apoio no TCC e pelo bom gosto na escolha de tema. Agradeço ao Jeferson, por ter me inspirado a cursar hidrogeologia duas vezes, o que foi muito importante para esse meu começo de carreira. Pela amizade, Jackson, Mateus (Tete), João Paulo, Ricardo, Tiago, Júnior, Júlia, Nara e tantos outros, a lista segue.

Por fim, agradeço aos leigos e anônimos colaboradores, como o Seu Clemente, que durante o mapeamento ajudou eu, Humberto e Wellington a entendermos um pouco melhor do granito Subida; com toda boa vontade nos indicou como saber quais eram os afloramentos *in situ*, sem nunca provavelmente sequer ter ouvido a palavra “afloramento”, muito menos “*in situ*”. Mas que sabia das rochas de onde estava pisando. Agradeço aos que carregam conhecimento, e que nunca esqueçamos que é no mundo que o conhecimento está, a academia é apenas uma forma específica de organizá-lo.

“To understand successes and analyze what caused them, we need to study the traits present in failures.” (Nassim Nicholas Taleb, 2007)

RESUMO

A estabilidade de taludes rochosos é determinada pela relação entre a resistência da rocha intacta e as características estruturais do maciço no qual se encontra. Em maciços de rocha branda, o peso dos parâmetros de resistência da rocha intacta na estabilidade aumenta consideravelmente. A região do Vale do Itajaí, em Santa Catarina, tem extenso histórico de deslizamentos, inclusive de rupturas planares, muitos dos quais às margens de rodovias com grande importância econômica. A proposta deste estudo consistiu na avaliação da estabilidade de um talude de rocha branda, intensamente alterada, localizado às margens da BR-470 em Gaspar, e composto por siltito – dentro do contexto geológico da Bacia do Itajaí. Assim, foi realizada uma avaliação da estabilidade puramente estrutural: análise cinemática; e duas análises por sistemas de classificação de maciços: *Slope Mass Rating* (SMR) e *Slope Stability Probability Classification* (SSPC), que incorporam parâmetros das descontinuidades e da rocha intacta. Com essas três análises, foi possível investigar a influência dos fatores estruturais e da resistência da rocha intacta na estabilidade do talude. Os resultados das classificações SMR e SSPC foram comparados, visto que a primeira tem utilização consolidada em diferentes regiões do mundo e a segunda ainda não foi devidamente testada em contextos distintos do qual foi desenvolvida. Como avaliação preliminar, a análise cinemática indicou instabilidade para rupturas planares e em cunha. As análises SMR resultaram em valores SMR baixos, de 20 a 34, que indicam desde rupturas por tombamento de blocos, grandes rupturas planares e/ou em cunha até rupturas circulares. O resultado da probabilidade de estabilidade SSPC independente de orientação foi de menos que 5%. A probabilidade de estabilidade SSPC para ruptura planar foi de 70% e para tombamento de blocos foi de 95%. Desta forma, as análises concordam quanto à extrema instabilidade do talude, ainda que com diferenças quanto a mecanismos. O sistema SMR se mostrou adequado para a avaliação de taludes de rocha branda nas condições climáticas da região. O sistema SSPC, por sua vez, ainda precisa de mais testes em contexto climático brasileiro, visto que foi criado em contexto europeu e resultou em avaliações divergentes em relação ao SMR.

Palavras-chave: Estabilidade de taludes. Análise cinemática. Classificação SMR. Classificação SSPC.

ABSTRACT

Rock slope stability is determined by the relationship between the intact rock strength and the structural features of the rock mass. In soft rock masses, the weight of intact rock strength parameters in stability increases considerably. The Itajaí Valley region, in the state of Santa Catarina, Brazil, has a long history of landslides, including planar failures, many of which at the margins of important highways. This study aims to evaluate the stability of a soft, highly altered, rock slope located at the margins of BR-470 in Gaspar. The rock mass is formed by siltite, in the geologic context of the Itajaí Basin. A purely structural stability assessment was undertaken: kinematic analysis; and two additional analyses by rock mass classifications: Slope Mass Rating (SMR) and Slope Stability Probability Classification (SSPC), which incorporate both discontinuity parameters and intact rock strength. By these three modes of assessment, the investigation of the influence of structural features and of the intact rock strength was made possible. The results of SMR and SSPC were compared, given that the first is widely adopted throughout the world and the second to this day was not properly tested in different climatic contexts than those of Europe. As a preliminary assessment, kinematic analysis indicated instability to planar and wedge failures. The SMR analyses resulted in low SMR values, from 20 to 34, which indicate failures by toppling, big planar/wedge failures and even circular, soil-like failures. The results of SSPC orientation independent stability indicates a probability of stability of less than 5%. Orientation dependent stability, on the other hand, indicates probability of stability of 70% for planar failures and of 95% for toppling. In this manner, the analyses agree about the extreme instability of the slope, although with differences regarding mechanisms. The SMR classification has proven adequate to assess the stability of soft rock slopes under the region's climatic conditions. The SSPC system, on the other hand, still needs more testing under Brazilian climate, given that it was developed for European contexts and had diverging results from those of SMR.

Keywords: Slope stability. Kinematic Analysis. SMR classification. SSPC classification.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de localização do talude estudado.....	4
Figura 2: Rocha intacta <i>versus</i> maciço rochoso.	6
Figura 3: Perfis de rugosidade típicos e nomenclatura sugerida pelo ISRM. O comprimento de cada perfil está na ordem de 1 a 10 m. As escalas vertical e horizontal são iguais.....	9
Figura 4: Tipos básicos de ruptura em taludes rochosos e estereogramas correspondentes.	13
Figura 5: Construção da envoltória de exposição e sua sobreposição com cone de atrito em um talude para ruptura planar.	16
Figura 6: Ruptura em cunha – sobreposição de cone de atrito e envoltória de exposição em um talude.	17
Figura 7: Possível viés do RQD devido à orientação do furo de sondagem.	20
Figura 8: Modelo de ruptura planar com os ângulos β_j , β_s , α_j e α_s	23
Figura 9: Esboço de exposições de maciços rochosos com variáveis graus de alteração e diferentes tipos de escavação, com indicação do conceito de maciço de referência.	26
Figura 10: Perfis de rugosidade em escala grande.	28
Figura 11: Perfis de rugosidade em escala pequena.....	28
Figura 12: Gráfico de determinação de fatores de acordo com espaçamento.	30
Figura 13: Critério para ruptura planar.....	32
Figura 14: Critério para tombamento de blocos.....	32
Figura 15: Gráfico de probabilidade de estabilidade independente de orientação.....	33
Figura 16: Comparação de avaliações de estabilidade em diferentes sistemas.....	34
Figura 17: Mapa geológico do Escudo Catarinense.....	37
Figura 18: Mapa geológico da Bacia do Itajaí.	38
Figura 19: Seções geológico-estruturais da BI. Mesmas cores da Figura 18.....	38
Figura 20: Coluna estratigráfica da BI para o mapa e seções anteriores.....	39
Figura 21: Mapa geológico da área no entorno do talude.	40
Figura 22: Desenho esquemático da evolução da BI segundo Krebs <i>et al.</i> (1990)....	41
Figura 23: Planilha padrão para levantamento de descontinuidades em campo.	44
Figura 24: Planilha padrão para coleta de dados SSPC.....	45

Figura 25: Imagem de satélite mais antiga da área no Google Earth – janeiro de 2003.	47
Figura 26: Imagem de satélite mais recente anterior à construção do talude estudado – março de 2015.	48
Figura 27: Primeiro registro de imagem de satélite após a construção do talude – maio de 2016.	48
Figura 28: Localização do talude estudado (vermelho) e do talude onde foram coletadas amostras (amarelo).....	49
Figura 29: Visão geral do talude.....	50
Figura 30: Amostra coletada no talude vizinho.....	51
Figura 31: Seção delgada produzida a partir da amostra coletada no talude.	51
Figura 32: Seção delgada ampliada em luz natural.	52
Figura 33: Seção delgada em nicóis cruzados.....	52
Figura 34: Sistema de drenagem danificado pelo rompimento do talude – vista para leste.....	53
Figura 35: Sistema de drenagem danificado pelo rompimento do talude – vista para oeste.....	54
Figura 36: Dobra decamétrica de S0 no talude estudado (eixo 07-220).	55
Figura 37: Dobra decimétrica de S0 no talude estudado (charneira 07-215). Interpretação à direita.	55
Figura 38: Ruptura planar maior ou cunha encoberta (direita) e ruptura menores em cunha (esquerda).....	56
Figura 39: Detalhe de uma pequena ruptura em cunha. Caderneta de escala.	57
Figura 40: Detalhe de pequenas rupturas em cunha. Caderneta de escala.	57
Figura 41: Planos S0 plotados em estereograma – Rede equiárea – hemisfério inferior.	59
Figura 42: Orientação média da família S0 em estereograma– Rede equiárea – hemisfério inferior.	59
Figura 43: Levantamento <i>scanline</i> da família J1.....	60
Figura 44: Planos J1 plotados em estereograma – Rede equiárea – hemisfério inferior.	61
Figura 45: Levantamento <i>scanline</i> das famílias J2a e J2b.	62
Figura 46: Planos J2a plotados em estereograma – Rede equiárea – hemisfério inferior.	63

Figura 47: Planos J2b plotados em estereograma – Rede equiárea – hemisfério inferior.	63
Figura 48: Linha de intersecção S0/J1 plotada em estereograma – Rede equiárea – hemisfério inferior.	64
Figura 49: Análise para ruptura planar com polos dos planos S0. Uma parte se encontra instável.	65
Figura 50: Análise cinemática para ruptura planar, com utilização do polo médio do acamamento.	66
Figura 51: Análise para ruptura planar com polos dos planos J1. Encontram-se estáveis.	66
Figura 52: Análise para ruptura planar com os polos dos planos J2a. Encontram-se estáveis.	67
Figura 53: Análise para ruptura planar com os polos dos planos J2b. Encontram-se estáveis.	67
Figura 54: Análise cinemática para ruptura em cunha, intersecção entre o acamamento (S0) e a família de fraturas J1.	68
Figura 55: Análise para ruptura em cunha para dois planos J2a que se intersectam na área de instabilidade.	69
Figura 56: Análise para ruptura em cunha para intersecção entre plano S0 e J2a na área de instabilidade.	69
Figura 57: Análise de estabilidade independente de orientação.	77
Figura 58: Análise de estabilidade da família S0 – ruptura planar.	79
Figura 59: Análise de estabilidade da família J2b – tombamento de blocos.	79
Figura 60: Ilustração das relações geométricas entre descontinuidade S0 e talude. ..	80
Figura 61: Ilustração das relações geométricas entre descontinuidade J1 e talude.	81
Figura 62: Ilustração das relações geométricas entre descontinuidade J2a e talude. .	82
Figura 63: Ilustração das relações geométricas entre descontinuidade J2b e talude. .	82
Figura 64: Ilustração das relações geométricas entre a linha de intersecção S0/J1 e talude.	83

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Designações de tamanho de blocos em função de J_v	12
Quadro 2: Parâmetros de classificação RMR.....	20
Quadro 3: Classes RMR conforme pontuação e descrição em termos de qualidade.	21
Quadro 4: Parâmetros e propriedades dos maciços rochosos conforme classificação RMR.....	21
Quadro 5: Valores de ajuste para F_4	23
Quadro 6: Classe do SMR associada com seu respectivo valor, estabilidade do talude, possíveis rupturas e contenção sugerida.	24
Quadro 7: Estimativas de resistência da rocha intacta.	27
Quadro 8: Análise dependente de orientação no sistema SSPC.....	31
Quadro 9: Probabilidades de estabilidade dependente de orientação nas descontinuidades investigadas por Canal e Akin (2016).	34
Quadro 10: Probabilidades de estabilidade independente de orientação nas descontinuidades investigadas por Canal e Akin (2016).	35
Quadro 11: Medidas representativas da família de descontinuidades S_0	58
Quadro 12: Medidas representativas da família de descontinuidades J_1	60
Quadro 13: Medidas representativas do grupo de descontinuidades J_{2a}	62
Quadro 14: Medidas representativas do grupo de descontinuidades J_{2b}	63
Quadro 15: Parâmetros e pesos para classificação RMR – família S_0	70
Quadro 16: Parâmetros e pesos para classificação RMR – família J_1	71
Quadro 17: Parâmetros e pesos para classificação RMR – famílias J_2	71
Quadro 18: Valores discretos e contínuos para os coeficientes SMR – família S_0 . ..	72
Quadro 19: Valores discretos e contínuos de SMR e respectiva classificação do maciço – família S_0	72
Quadro 20: Valores discretos e contínuos para os coeficientes SMR – família J_1	73
Quadro 21: Valores discretos e contínuos de SMR e respectiva classificação do maciço – família J_1	73
Quadro 22: Valores discretos e contínuos para os coeficientes SMR – intersecção entre S_0 e J_1	73
Quadro 23: Valores discretos e contínuos de SMR e respectiva classificação do maciço – intersecção S_0 e J_1	74
Quadro 24: Valores discretos e contínuos para os coeficientes SMR – família J_{2a}	74

Quadro 25: Valores discretos e contínuos de SMR e respectiva classificação do maciço – família J2a.	74
Quadro 26: Valores discretos e contínuos para os coeficientes SMR – família J2b. .	75
Quadro 27: Valores discretos e contínuos de SMR e respectiva classificação do maciço – família J2b.	75
Quadro 28: Dados SSPC das descontinuidades levantados em campo.	76
Quadro 29: Resumo e comparação dos resultados.	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Az – Azimute

BA – Bahia

BI – Bacia do Itajaí

CPRM – Serviço Geológico do Brasil (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais)

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

Fm. – Formação

Hmax – Altura máxima do talude (*maximum height*)

Hslope – Altura do talude (*slope height*)

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IRS - *Intact Rock Strenght*

ISRM – *International Society for Rock Mechanics*

NE – Nordeste

NW – Noroeste

RCOH – Coesão do maciço de referência

RFRI – Ângulo de atrito do maciço de referência

RIRS – *Reference Intact Rock Strenght*

RMR - Rock Mass Rating

RMR_B - índice RMR básico

RMS – *Rock Mass Strength*

RQD - *Rock Quality Designation*

RSPA – *Reference discontinuity spacing*

SC – Santa Catarina

SCOH – Coesão do talude

SE – Sudeste

SFRI – Ângulo de atrito do talude

SIRS – Resistência da rocha intacta do talude

SMR - *Slope Mass Rating*

SSPC - Slope Stability Probability Classification

STC – *Discontinuity condition of the slope*

SW – Sudoeste

WE – *Weathering Degree Factor*

LISTA DE SÍMBOLOS

α_j – *strike* da descontinuidade

α_s – *strike* do talude

β_j – ângulo de mergulho da descontinuidade

β_s – ângulo de mergulho do talude

cm – Centímetro

Φ – ângulo de atrito interno

° - grau

J_v – parâmetro que indica o número de descontinuidades por volume (*volumetric joint count*)

kg – Quilogramas

km - Quilômetro

kPa – Quilo Pascal

Ma – Milhões de Anos

m – Metro

mm – Milímetro

MPa – Mega Pascal

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	2
1.1	OBJETIVOS.....	2
1.1.1	Objetivo Geral	2
1.1.2	Objetivos Específicos	2
1.2	JUSTIFICATIVA.....	3
1.3	LOCALIZAÇÃO.....	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	MECÂNICA DAS ROCHAS.....	5
2.1.1	Descontinuidades	7
2.2	ESTABILIDADE DE TALUDES EM ROCHAS	11
2.2.1	Tipos de ruptura	12
2.2.1.1	<i>RUPTURA CIRCULAR</i>	13
2.2.1.2	<i>RUPTURA PLANAR</i>	14
2.2.1.3	<i>RUPTURA EM CUNHA</i>	14
2.2.1.4	<i>TOMBAMENTO DE BLOCOS</i>	14
2.2.2	Análise cinemática	15
2.3	SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS	17
2.3.1	<i>Rock Mass Rating (RMR)</i>	18
2.3.2	<i>Slope Mass Rating (SMR)</i>	21
2.3.3	<i>Slope Stability Probability Classification (SSPC)</i>	25
2.4	CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL.....	36
3	METODOLOGIA	42
3.1	ANÁLISE DE IMAGENS DE SATÉLITE.....	42
3.2	CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-ESTRUTURAL.....	42
3.3	LEVANTAMENTO DE DESCONTINUIDADES	42
3.4	ANÁLISE CINEMÁTICA.....	46

3.5	CLASSIFICAÇÃO DO MACIÇO	46
3.6	INTEGRAÇÃO DE DADOS	46
4	RESULTADOS.....	47
4.1	ANÁLISE DE IMAGENS DE SATÉLITE.....	47
4.2	CARACTERIZAÇÃO GERAL DO TALUDE	49
4.2.1	Orientação e dimensões.....	49
4.2.2	Caracterização litológica	50
4.2.3	Condições de drenagem	53
4.2.4	Caracterização estrutural.....	54
4.2.5	Caracterização das rupturas	56
4.3	DADOS DAS DESCONTINUIDADES	58
4.3.1	Família S0.....	58
4.3.2	Família J1.....	60
4.3.3	Famílias J2a e J2b	62
4.3.4	Cunha S0/J1	64
4.4	ANÁLISE CINEMÁTICA.....	65
4.4.1	Análise de ruptura planar	65
4.4.2	Análise de ruptura em cunha	68
4.5	SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO	70
4.5.1	<i>Rock Mass Rating (RMR)</i>	70
4.5.2	<i>Slope Mass Rating (SMR)</i>	71
4.5.2.1	<i>FAMÍLIA S0</i>	72
4.5.2.2	<i>FAMÍLIA J1</i>	72
4.5.2.3	<i>CUNHA S0/J1</i>.....	73
4.5.2.4	<i>FAMÍLIAS J2</i>	74
4.5.3	<i>Slope Stability Probability Classification (SSPC)</i>.....	76
4.5.3.1	<i>CARACTERIZAÇÃO SSPC DO AFLORAMENTO</i>	76

4.5.3.2	<i>MACIÇO DE REFERÊNCIA</i>	76
4.5.3.3	<i>ESTABILIDADE INDEPENDENTE DE ORIENTAÇÃO</i>	77
4.5.3.4	<i>ESTABILIDADE DEPENDENTE DE ORIENTAÇÃO</i>	78
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	80
6	CONCLUSÕES	86
7	REFERÊNCIAS	88

1 INTRODUÇÃO

Este estudo é voltado para a caracterização, classificação e análise da estabilidade de um talude rochoso localizado às margens da BR470, uma importante rodovia catarinense, na região do Vale do Itajaí – Gaspar, SC. O maciço rochoso no qual o talude se situa apresenta cicatrizes de deslizamentos e é constituído por um siltito intensamente alterado da Formação Garcia da Bacia do Itajaí – uma rocha branda, portanto.

A fim de avaliar a estabilidade do talude, foram utilizados quatro métodos: análise cinemática, e sistemas de classificação de maciços *Rock Mass Rating* (RMR – Bieniawski, 1974), *Slope Mass Rating* (SMR – Romana, 1985) e *Slope Stability Probability Classification* (SSPC – Hack, 1998). Todas formas bastante distintas de abordar um mesmo problema, o que colabora para uma visão abrangente da questão.

Esse documento se inicia com uma revisão conceitual dos tópicos de mecânica de rochas, estabilidade de taludes e de sistemas de classificação de maciços. O contexto geológico da área de estudo é apresentado e a metodologia é descrita. A seguir, os resultados da caracterização do maciço, das descontinuidades, das análises cinemáticas, dos sistemas de classificação RMR, SMR e SSPC são expostos e discutidos. Por fim, as conclusões do estudo e recomendações são apresentadas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desse estudo é a avaliação das condições de estabilidade de um talude de rocha branda localizado às margens da BR-470, no município de Gaspar, Santa Catarina, de forma a adquirir, assim, competências e habilidades para a aplicação das técnicas necessárias para a avaliação da estabilidade de taludes em maciços rochosos, com o propósito de possibilitar a atuação profissional na área de geologia aplicada à engenharia..

1.1.2 Objetivos Específicos

Por meio deste estudo, almeja-se também:

- Investigar as semelhanças e diferenças dos métodos de avaliação de estabilidade de taludes rochosos: análise cinemática, sistemas de classificação RMR, SMR e SSPC – em especial, dos últimos dois métodos.

1.2 JUSTIFICATIVA

Desastres naturais com o envolvimento de deslizamentos têm ocorrência periódica na região litorânea de Santa Catarina e no Vale do Itajaí, por conta da junção de fatores climáticos, geológicos e antrópicos, o que causa graves prejuízos sociais e econômicos. Dentro dos fatores derivados de condicionantes geológicas, as litologias e seus graus de intemperismo, aliadas à geologia estrutural, podem ser determinantes quanto ao acontecimento de desastres.

O entendimento do campo de mecânica das rochas aplicado à estabilidade de taludes, dos fatores condicionantes de instabilidade de encostas naturais ou escavadas e da aplicação da geologia de engenharia para avaliar e solucionar problemas decorrentes da interação da atividade humana com o meio natural é fundamental para os profissionais de geologia que se inserem no mercado de trabalho em território catarinense. A aplicação de técnicas de análise de estabilidade de taludes em maciços rochosos é indispensável não apenas para obras em vias de transporte, mas também para atividades de mineração, infraestrutura energética e demais obras civis.

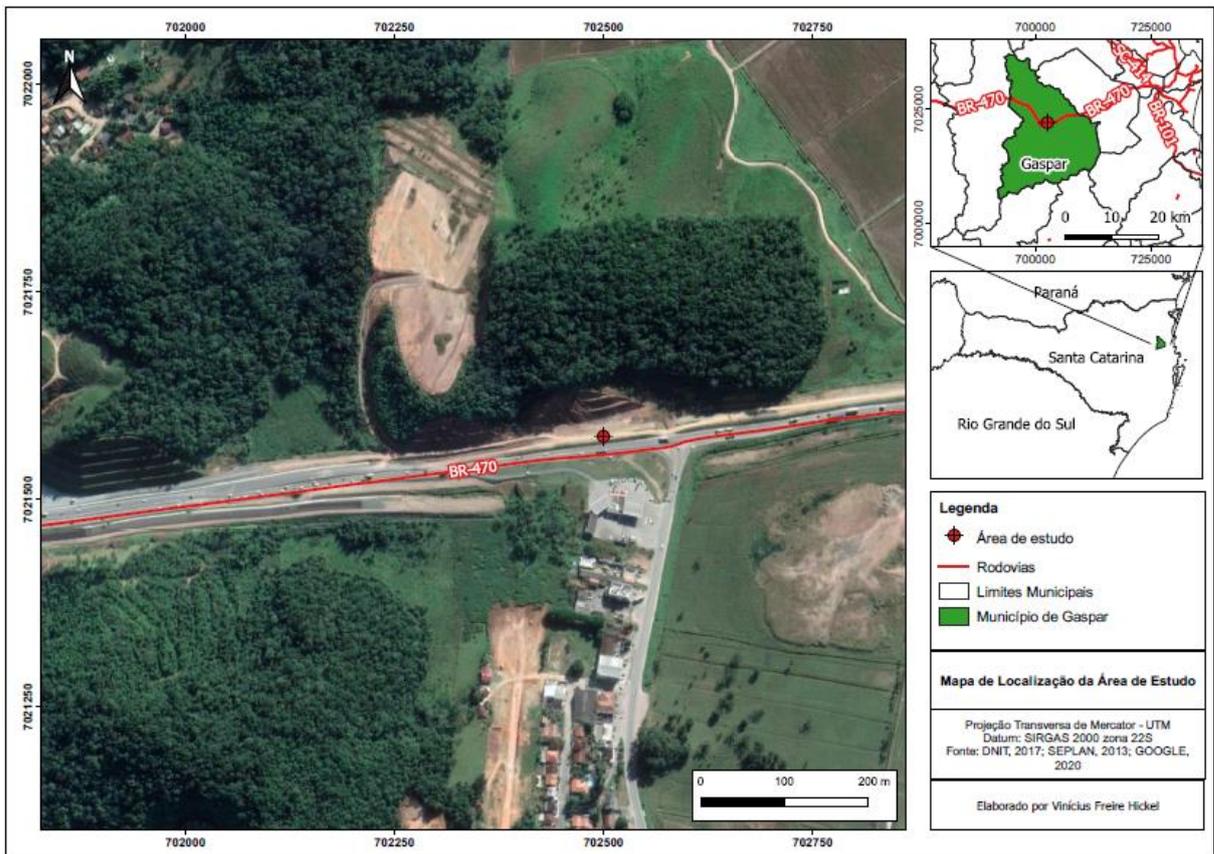
Em termos gerais, a mecânica das rochas é comandada por fatores estruturais: orientação e demais características das descontinuidades (juntas, fraturas, falhas, etc.), visto que a ruptura através do tecido da rocha exige muito mais energia do que o deslocamento em planos de fraqueza. De acordo com Willye & Mah (2004), em muitos cortes de rocha de projetos civis, as tensões atuantes na rocha costumam ser muito menores que a resistência da rocha, então há pouca preocupação quanto à ocorrência de fraturamento da rocha intacta. No entanto, o objeto de estudo é constituído por uma rocha branda, rochas que, em termos mecânicos, possuem comportamento distinto de rochas duras, coesas, pois a possibilidade de ruptura através das partes não fraturadas da rocha é maior. Quando da presença de descontinuidades, é duvidoso o grau de influência de cada fator na estabilidade do maciço e isto é merecedor de estudo.

Dessa forma, esse estudo se insere como uma oportunidade de desenvolvimento das competências em levantamentos de dados estruturais e geotécnicos em campo, análise cinemática, retroanálise e sistemas de classificação de maciços, assim como na contribuição da avaliação do risco que o objeto de estudo oferece à via rodoviária.

1.3 LOCALIZAÇÃO

O talude estudado está situado no km 43 da BR- 470, no município de Gaspar, SC (Figura 1) – a cerca de 135 km de Florianópolis.

Figura 1: Mapa de localização do talude estudado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção, os conceitos fundamentais utilizados na elaboração deste trabalho serão brevemente apresentados e definidos. O objetivo é introduzir as temáticas, assim como estabelecer definições para os termos, de forma a evitar ambiguidades e a deixar clara a abordagem teórica adotada. Ainda que de caráter apenas introdutório, esta revisão não trata de definições muito básicas.

2.1 MECÂNICA DAS ROCHAS

A mecânica das rochas é um campo interdisciplinar, concentrado no estudo do comportamento mecânico de maciços rochosos e, de forma mais específica, na resposta das rochas às forças atuantes em seu meio físico (BIENIAWSKI, 1984).

Na concepção de Goodman (1989), esta disciplina lida com as propriedades das rochas e com a metodologia especial necessária para o projeto dos componentes relativos a rochas em obras de engenharia. Para Bieniawski (1984), trata-se de uma ciência teórica e aplicada, e algumas áreas de aplicação incluem mineração, transporte, infraestrutura energética, petróleo, dentre outras.

Ao tentar modelar o comportamento mecânico de um sólido qualquer, é comum presumir que ele seria idealmente homogêneo, contínuo, isotrópico (não direcional em suas propriedades), linear, e elástico; rochas, porém, são não-ideais em diversas maneiras (GOODMAN, 1989).

Em microescala, poros e fissuras são comuns em rochas, portanto elas são raramente contínuas; o efeito disso: respostas não-lineares de carga/deformação, resistência à tração reduzida, propriedades materiais dependentes do estado de tensões, variabilidade e dispersão em resultados de ensaios, e efeitos de escala em estimativas de comportamento (GOODMAN, 1989). Singh e Goel (1999) reconhecem que sempre há microfraturas no material rochoso, mas que essas não devem ser tratadas como fraturas.

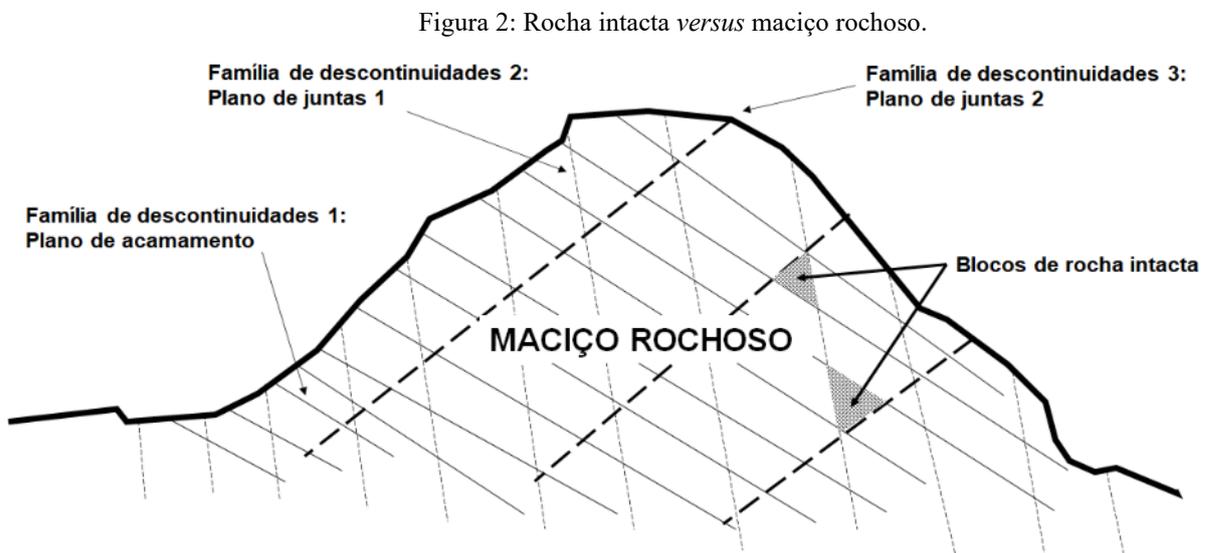
Em macroescala, uma não-idealidade relacionada é a presença de descontinuidades, e a mecânica de rochas descontínuas é de especial relevância para a engenharia de estruturas superficiais, escavações superficiais e escavações subterrâneas rasas (GOODMAN, 1989). Isso inclui taludes rochosos escavados em obras rodoviárias, objeto de estudo deste trabalho.

De acordo com Fiori e Carmignani (2013), a avaliação das propriedades geotécnicas de um maciço requer conhecimento a respeito das propriedades da rocha intacta, da ocorrência e natureza das descontinuidades, da extensão, do grau de alteração e da sua posição espacial no maciço. A mecânica das rochas inclui, portanto, aspectos não considerados em outros campos de mecânica aplicada, e deve andar lado a lado com a geologia e a engenharia geológica (GOODMAN, 1989).

Um maciço rochoso com descontinuidades é constituído por blocos discretos, de formas

geométricas mais ou menos irregulares, com propriedades de rochas intactas; com a designação rocha intacta, refere-se a rochas que não apresentam descontinuidades ou planos de fraqueza (FIORI; CARMIGNANI, 2013). Na concepção de Hack (1998), rocha intacta é o material rochoso que não contém descontinuidades mecânicas e possui resistência à tração. É importante notar que nenhuma dessas definições postula que a rocha deve ser sã, então é possível que a rocha intacta seja bastante alterada, tornada mais branda pela ação do intemperismo químico. Parece contra intuitivo, algo intacto ter sofrido ação de agentes externos, porém é uma forma útil de pensar os problemas em mecânica das rochas.

Ainda de acordo com Hack (1998), um maciço rochoso pode ser constituído apenas por rocha intacta, porém, maciços rochosos são mais comumente formados por conjuntos de blocos de rocha intacta, delimitados por descontinuidades (Figura 2).



Fonte: adaptado de Hack (1998).

Além disso, quando comparado a uma mesma massa de rocha intacta, um maciço rochoso é composto por zonas alternadas de rocha intemperizada em graus variados e com propriedades físicas muito diferentes (FIORI; CARMIGNANI, 2013). Portanto, é amplamente aceito que a resistência de um maciço rochoso depende mais dos parâmetros das descontinuidades presentes do que propriamente da resistência da rocha intacta que o constitui (FIORI; CARMIGNANI, 2013). Bieniawski (1984) nota que as propriedades da rocha intacta são ofuscadas pelas propriedades das descontinuidades geológicas; no entanto, enfatiza que isso não significa que as propriedades do material intacto devem ser desconsideradas ao avaliar o comportamento de maciços descontínuos.

2.1.1 Descontinuidades

Descontinuidades são planos de fraqueza presentes em maciços, ao longo dos quais o material rochoso é estruturalmente descontínuo e apresenta resistência ao cisalhamento reduzida em relação à rocha intacta, ou mesmo nula, a depender da frequência e natureza do preenchimento das descontinuidades presentes (FIORI; CARMIGNANI, 2013).

Hack (1998) apresenta mais rigor em sua concepção: uma descontinuidade é um plano ou superfície que marca uma mudança em características físicas ou químicas do material rochoso; uma divisão então é feita entre descontinuidades integrais e descontinuidades mecânicas – essas sim planos de fraqueza. Fraturas, juntas, etc. são descontinuidades mecânicas se a resistência à tração perpendicular a elas ou a resistência ao cisalhamento ao longo delas forem menores que aquelas do material rochoso circundante (ISRM, 1978). Descontinuidades integrais são tão resistentes quanto o material ao redor, e podem se tornar descontinuidades mecânicas devido à ação intempérica: reações químicas que mudam as características mecânicas (HACK, 1998). Neste trabalho, o termo *descontinuidades* será empregado para denotar descontinuidades mecânicas, exceto quando explicitado.

Descontinuidades podem se apresentar como feições isoladas ou em famílias. Uma família é um grupo de descontinuidades com uma mesma orientação e espaçamento regular, para as quais a origem geológica e características mecânicas (ângulo de atrito, rugosidade, preenchimento, etc.) são em geral as mesmas (HACK, 1998).

Uma série de tipos de descontinuidades naturais podem ser encontradas em maciços, tais como falhas, juntas, planos de acamamento, laminação, planos de foliação, zonas de cisalhamento, fendas de tração, veios e diques (FIORI; CARMIGNANI, 2013). A seguir, os tipos de descontinuidades mais relevantes para esse trabalho e suas características serão brevemente apresentados.

Planos de acamamento: constituem os planos de separação de diferentes estratos de rochas sedimentares, são normalmente paralelos e concordantes uns com os outros, e sua característica mais fundamental é a grande persistência lateral, que costuma se estender por áreas maiores que qualquer outro tipo de descontinuidade (FIORI; CARMIGNANI, 2013).

Planos de juntas: na literatura geotécnica referente à mecânica das rochas, nem sempre o termo *juntas* é empregado em seu significado estrito geológico, muitas vezes utiliza-se a designação de forma genérica (FIORI; CARMIGNANI, 2013). Neste trabalho, busca-se utilizar a conceituação geológica estrita: como uma ruptura praticamente sem deslocamento (ISRM, 1978). Juntas costumam compor famílias, e quando duas ou mais famílias ocorrem em conjunto, constitui-se um sistema de juntas; porém, não é possível extrapolar características de uma família para a(s) outra(s), pois sua origem mecânica e história geológica podem diferir (FIORI; CARMIGNANI, 2013).

Fiori e Carmignani (2013) afirmam que planos de juntas são muito comuns, desenvolvem-se pela atuação ou relaxamento de tensões, em praticamente todos os tipos de rocha; famílias de juntas são normalmente paralelas ou subparalelas a falhamentos locais, com os quais costuma haver relação

genética.

Quanto à influência das descontinuidades na resistência e deformabilidade dos maciços, é possível elencar fatores como: orientação, espaçamento, abertura, preenchimento, rugosidade, persistência ou extensão, grau de alteração, resistência das paredes e presença de água (WILLIE; MAH, 2004).

A orientação de uma descontinuidade é representada pelo seu mergulho, *i.e.*, sua inclinação em relação à horizontal, medido em graus, e pela sua direção de mergulho, medida em Azimute.

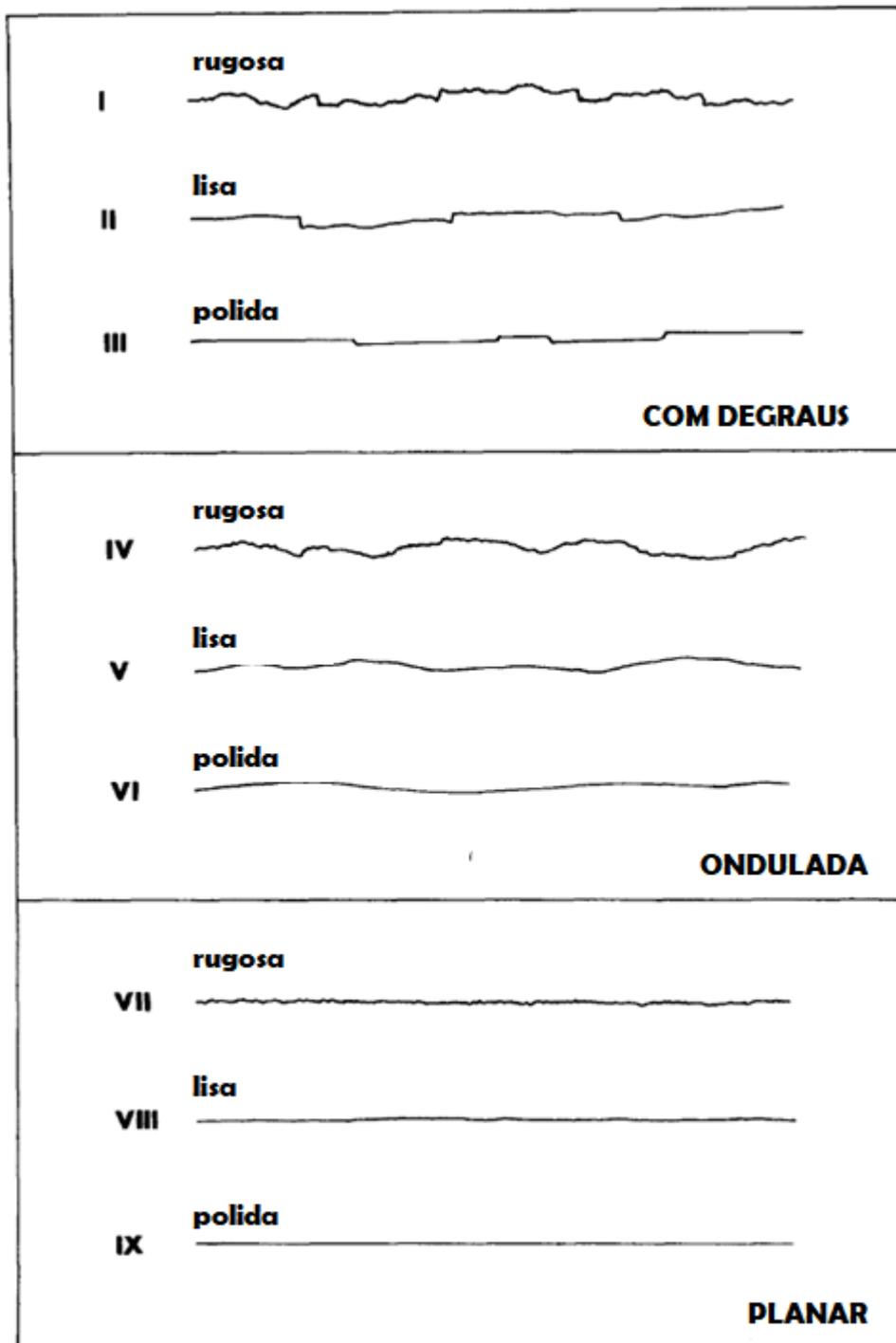
O espaçamento é a distância perpendicular entre descontinuidades de um mesmo grupo.

A abertura é indicada pela distância perpendicular entre duas paredes adjacentes de uma descontinuidade se esse espaço for preenchido por ar ou água. De acordo com Willye & Mah (2004), a abertura pode ser medida em afloramentos ou túneis contanto que extremo cuidado seja tomado para se descontar qualquer descontinuidade aberta por influência de detonação.

Preenchimento diz respeito ao material que separa paredes adjacentes de uma descontinuidade, tanto em termos qualitativos quanto de espessura. Uma descrição completa do material de preenchimento é necessária para se estimar o comportamento da descontinuidade (WILLIE; MAH, 2004).

A rugosidade de uma descontinuidade é uma componente importante da sua resistência ao cisalhamento. A obtenção deste parâmetro pode ser feita tanto por medição direta do ângulo de inclinação das irregularidades (ou asperidades), quanto por comparação com perfis padrão de superfícies irregulares de descontinuidades. Na Figura 3, esses perfis padrão, conforme o ISRM, são apresentados.

Figura 3: Perfis de rugosidade típicos e nomenclatura sugerida pelo ISRM. O comprimento de cada perfil está na ordem de 1 a 10 m. As escalas vertical e horizontal são iguais.



Fonte: ISRM (1978).

A persistência diz respeito aos comprimentos ou à área contínua de uma descontinuidade. Pode ser medida ao longo do *strike* ou ao longo do mergulho.

O grau de alteração é categorizado desde rocha fresca até solo residual. A alteração se dá por decomposição e desintegração (WILLYE; MAH, 2004). A decomposição é o resultado do intemperismo

químico, como a oxidação, a hidratação e a carbonatação; a desintegração, por sua vez, é resultado de condições ambientais como congelamento e descongelamento, molhagem e secagem, que quebram a rocha em sua parte exposta.

A resistência à compressão das paredes pode ser determinada por testes simples em campo ou por meio de martelo de Schmidt. No item 3.3, esses testes simples são abordados. A resistência das paredes é expressa em MPa.

2.2 ESTABILIDADE DE TALUDES EM ROCHAS

Avaliações da estabilidade de taludes rochosos podem ser executadas com base em análises cinemática, analítica e numérica (CANAL; AKIN, 2016). O problema central a ser postulado na avaliação da estabilidade de taludes rochosos se refere aos possíveis *mecanismos de ruptura* e seus resultantes *tipos de ruptura*, função da orientação do talude, das orientações das descontinuidades, dos parâmetros de resistência das descontinuidades e dos parâmetros de resistência da rocha intacta.

Em rochas brandas como argilitos, zonas de alteração hidrotermal e granitos altamente intemperizados, a estabilidade de taludes é uma extensão da teoria de mecânica dos solos, visto que tais materiais tendem a romper através do corpo rochoso em si (GOODMAN, 1989). Em taludes rochosos altamente fraturados, do mesmo modo, a ruptura ocorre em múltiplas superfícies, ao invés de num único plano, e a superfície de ruptura é quase circular, similar às que ocorrem em solos (CANAL; AKIN, 2016). Este efeito é mais proeminente em maciços rochosos nos quais o tamanho médio dos blocos é menor (HACK; PRICE; RENGERS, 2003). Estas rochas intensamente fraturadas podem se comportar de forma “pseudocontínua”, pois exibem muitas combinações de modos e tipos de ruptura (GOODMAN, 1989). Taludes em tais rochas têm sido analisados com a aplicação de técnicas de mecânica dos solos (HOEK; BRAY, 1981).

Uma forma de avaliar o tamanho dos blocos para estimar a ocorrência de rupturas relativamente circulares pode ser executada por meio do parâmetro J_v , que indica o número de descontinuidades por volume (*volumetric joint count*), proposto por Palmström (1982). No caso de um maciço com 3 famílias de descontinuidades, de espaçamentos S_1, S_2 e S_3 , J_v é dado pela seguinte relação:

$$J_v = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \frac{1}{S_3} \quad (1)$$

A relação entre o parâmetro J_v e o tamanho de blocos é dada no Quadro 1.

Quadro 1: Designações de tamanho de blocos em função de J_v .

Designação	J_v (Juntas/m ³)
Blocos muito grandes	<1,0
Blocos grandes	1 – 3
Blocos médios	3 – 10
Blocos pequenos	10 – 30
Blocos muito pequenos	>30
Rocha esmagada	>60

Fonte: Barton *et al.* (1974).

Na maior parte das rochas duras, assim como em algumas das mais brandas, descontinuidades preexistentes controlam os caminhos de movimentação, portanto ocorrem formas de ruptura que não são usuais em solos (GOODMAN, 1989). Quanto maior a diferença de resistência entre as descontinuidades e a rocha intacta, mais distintas da mecânica dos solos clássica são as maneiras de ruptura.

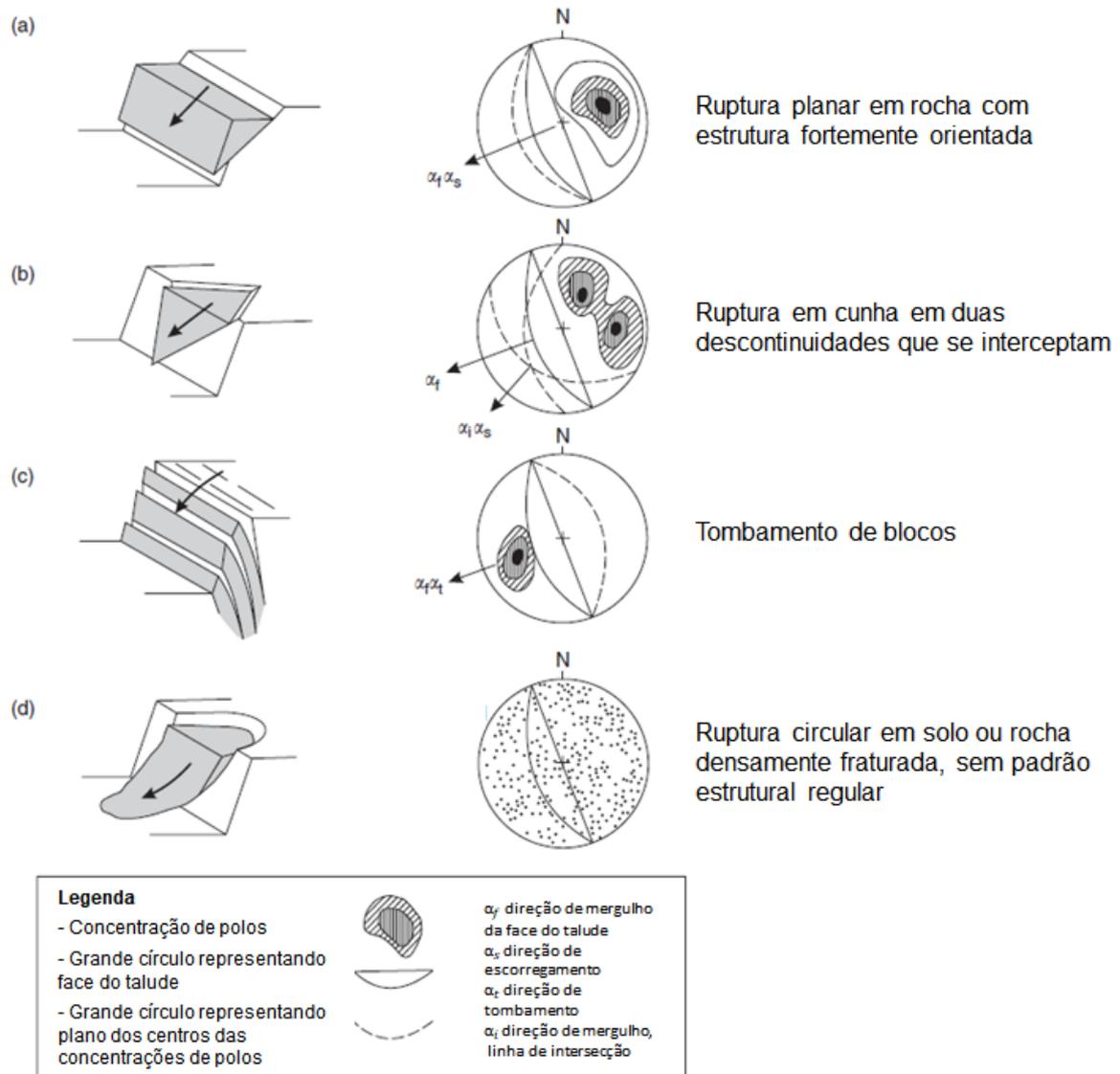
É possível, portanto, quanto à influência da orientação relativa entre face do talude e descontinuidades, diferenciar dois modos ideais de rupturas: em um extremo, aquele no qual a ruptura depende completamente das orientações (é condicionada, portanto, pelas descontinuidades apenas, com movimentação dos blocos de rocha presentes, sem ruptura interna); e no outro, aquele no qual a ruptura independe de orientações das descontinuidades e passa pela própria rocha intacta (HACK; PRICE; RENGERS, 2003). Em muitos taludes instáveis, modos e tipos múltiplos podem ocorrer em um mesmo momento ou sucessivamente, e nem todos podem ser facilmente reconhecíveis; nesses taludes, a contribuição de cada modo e tipo à instabilidade geral deve ser quantificada (HACK; PRICE; RENGERS, 2003).

Ou seja, neste trabalho, opta-se por definir modo de ruptura quanto à dependência em relação a orientações; os tipos de ruptura são definidos a seguir.

2.2.1 Tipos de ruptura

Em geral, os deslizamentos em maciços rochosos podem ser classificados de acordo com o modo de ruptura. Quando independem de orientação (ou seja, das orientações relativas do talude e das descontinuidades), as rupturas podem ser mais ou menos rotacionais ou curvilineares; é possível ainda haver deslizamentos relativamente planares nestas condições. Quando a orientação importa, as rupturas podem ser planares, em cunha, ou por tombamento de blocos. Como mencionado anteriormente, estes são os tipos ideais e puros, na prática nem sempre isso é observado. A seguir, mais detalhes a respeito de cada um destes tipos (Figura 4).

Figura 4: Tipos básicos de ruptura em taludes rochosos e estereogramas correspondentes.



Fonte: Hoek e Bray (1981), modificado por Willye & Mah (2004) e traduzido pelo autor.

2.2.1. RUPTURA CIRCULAR

Como citado anteriormente, esse tipo de ruptura pode ocorrer quando o material é muito brando e/ou quando o maciço rochoso é muito fraturado, ou seja, quando as partículas individuais no maciço são diminutas em comparação com o tamanho do talude e quando não estão interligadas como resultado de seu formato (HOEK; BRAY, 1981). Este tipo de ruptura é extensivamente abordado em cursos e livros-texto de mecânica dos solos, para mais detalhes se recomenda sua consulta.

2.2.1.2 RUPTURA PLANAR

Deslizamentos planares ocorrem ao longo de uma ou mais superfícies subparalelas, como planos de acamamento, juntas, etc. (HOEK; BRAY, 1981; FIORI; CARMIGNANI, 2013). Formam-se sob a ação da gravidade quando um bloco rochoso possui tais estruturas aflorantes e inclinadas na direção da face livre do talude, com inclinação maior do que o ângulo de atrito interno do plano e menor que da face livre do talude (GOODMAN, 1989).

2.2.1.3 RUPTURA EM CUNHA

Rupturas em cunha ocorrem quando dois planos de fraqueza se intersectam de forma a definir blocos tetraédricos e a linha de intersecção aflora inclinada na direção da face livre do talude (GOODMAN, 1989), com caimento a um ângulo superior ao ângulo de atrito interno (FIORI; CARMIGNANI, 2013).

De acordo com Lisle e Leyshon (2018), o caimento da linha de intersecção não pode ser muito íngreme, pois uma restrição importante é que ela aflore duas vezes: uma vez na face livre do talude e outra na superfície acima do talude.

Fiori e Carmignani (2013) afirmam ainda que as forças mobilizantes e resistentes que atuam neste tipo de deslizamento requerem análises mais complexas que as envolvidas em rupturas planares, pois os planos podem apresentar inclinações muito diferentes, o que denota forças normais diferentes a atuar em cada plano, assim como ambos planos podem apresentar diferentes valores de ângulo de atrito.

2.2.1.4 TOMBAMENTO DE BLOCOS

O tombamento de blocos (*toppling*) envolve um mecanismo diferente de movimentação de blocos rochosos, não relacionado a deslizamento propriamente dito (FIORI; CARMIGNANI, 2013). Nos blocos, quando tombam, há rotação sobre eixos fixos, na direção da face livre do talude. As condições mais favoráveis para tal ocorrem quando duas famílias de descontinuidades se entrecruzam, com mergulho de alto ângulo contra a face livre do talude e a outra com mergulho de baixo ângulo no mesmo sentido do talude (HOEK; BRAY, 1981).

2.2.2 Análise cinemática

Cinemática se refere ao movimento de corpos sem referência às forças que os causam (GOODMAN, 1989). A análise cinemática é uma ferramenta importante para o *design* de taludes rochosos em maciços descontínuos, por meio da utilização de parâmetros de direção do maciço rochoso, com vistas a assegurar que sempre haja rocha “no caminho” de potenciais blocos de ruptura (GOODMAN, 1989). A grosso modo, a avaliação central em análise cinemática diz respeito à liberdade de movimentação dos blocos, condicionada pelas direções das descontinuidades, relativas à direção do(s) corte(s) do talude – *i.e.* pela relação angular entre ambos grupos – além disso, parâmetros de resistência podem ser inseridos nestas análises.

Ao se considerar a importância das orientações nessas análises, projeções estereográficas apresentam-se como uma ferramenta atraente, pois dessa forma, relações tridimensionais podem ser facilmente representadas e manipuladas (GOODMAN, 1989). Para discussões mais aprofundadas a respeito da utilização de técnicas de projeção estereográfica, seus fundamentos e suas diversas aplicações, recomenda-se a consulta de bibliografia específica, como o livro-texto de Lisle e Leyshon (2018).

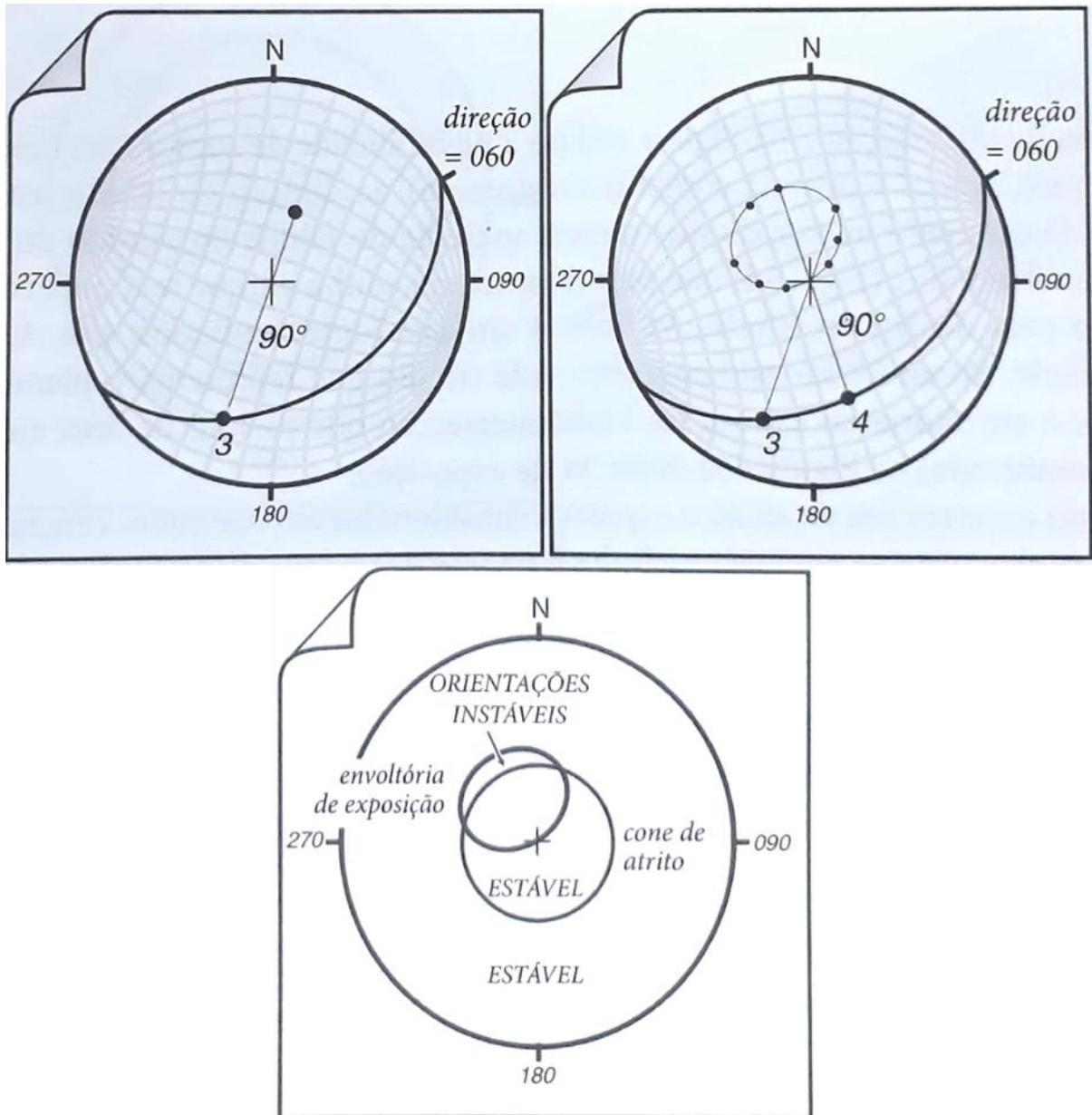
A análise cinemática é preferível quando a rocha é enfraquecida por grupos de descontinuidades regulares e bem definidas (GOODMAN, 1989). Quando múltiplos grupos de planos de descontinuidades se intersectam em planos oblíquos, estudos de modelos cinemáticos podem ajudar na antecipação dos padrões mais prováveis de ruptura (GOODMAN, 1989). No entanto, de acordo com Canal e Akin (2016), análises cinemáticas devem ser levadas em consideração apenas para estimativas preliminares de instabilidades em maciços rochosos, visto que elas não envolvem soluções geométricas e não são especificamente voltadas para projetos.

Segundo Fiori e Carmignani, (2013), as análises estereográficas são adimensionais e ignoram parâmetros intimamente relacionados à estabilidade dos taludes: os efeitos da água no subsolo, a coesão e a altura da vertente; por outro lado, é possível incorporar parâmetros importantes no estudo, como o ângulo de atrito das descontinuidades e a atitude das vertentes.

A avaliação via análise cinemática será exposta para rupturas planares e em cunha. As relações angulares entre o talude e as descontinuidades são avaliadas por meio de um estereograma, no qual a informação de ângulo de atrito é inserida (na forma de um cone de atrito). As condições de exposição dos planos de fraqueza são então avaliadas, a depender do tipo de ruptura.

Para rupturas planares, o procedimento envolve a justaposição da envoltória de exposição e do cone de atrito. A envoltória de exposição (*daylight envelope*) é uma curva feita de polos de planos que são marginais em termos de exposição (LISLE; LEYSHON, 2018). A área situada fora do cone de atrito (sombreada na Figura 5) e dentro da envoltória contém os polos dos planos de descontinuidades que podem levar a um deslizamento planar.

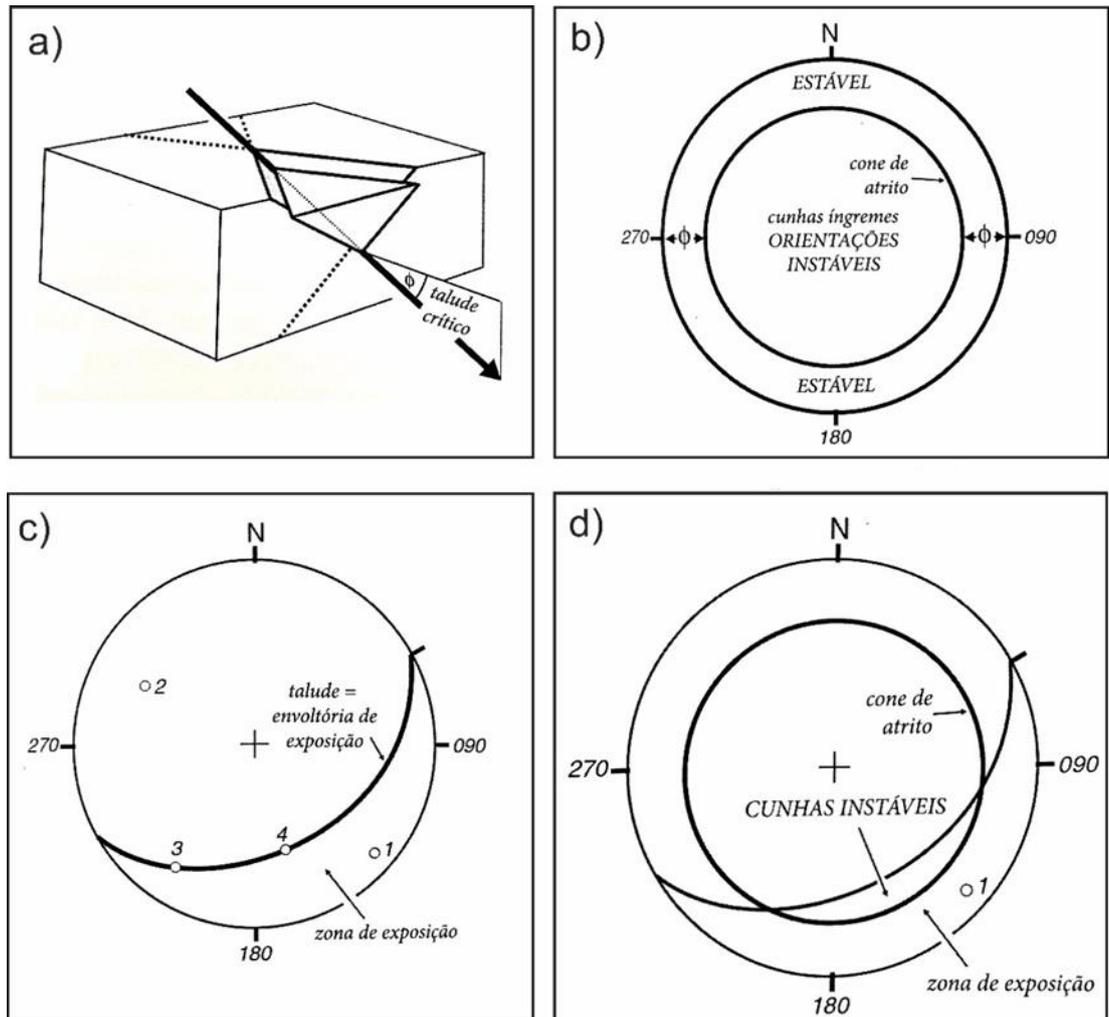
Figura 5: Construção da envoltória de exposição e sua sobreposição com cone de atrito em um talude para ruptura planar.



Fonte: Lisle e Leyshon (2018).

No caso de rupturas em cunha, o caimento da linha de interseção entre dois planos de descontinuidades é avaliado. É importante notar que o cone de atrito se expressa de forma diferente para um mesmo ϕ , pois quando se avalia ruptura planar, o dado inserido no diagrama é referente a polos de planos, enquanto na ruptura em cunha, o dado inserido é referente a linhas. Ambos são linhas em estereogramas, mas os polos de planos representam algo que mergulha com 90° de diferença do que está representado. Portanto, uma ruptura em cunha se torna possível quando a linha de interseção se situa no interior do cone de atrito e da zona de exposição, ou seja, na área destacada da Figura 6.

Figura 6: Ruptura em cunha – sobreposição de cone de atrito e envoltória de exposição em um talude.



Fonte: Lisle e Leyshon (2018).

2.3 SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS

Nem sempre é possível ou conveniente fazer ensaios e testes definitivos para basear decisões de engenharia que envolvem rochas; quando há necessidades particulares e recorrentes para valores quantitativos, testes-índice são usados rotineiramente: sistemas desenvolvidos de forma a guiar o julgamento por meio da padronização de procedimentos e descrições (GOODMAN, 1989). Classificações de maciços rochosos são um sistema de comunicação universal para engenheiros, ao fornecer dados quantitativos e procedimentos que podem melhorar descrições originalmente abstratas de maciços rochosos a partir de parâmetros inerentes e estruturais (PANTELIDIS, 2009), por meio de algoritmos aritméticos simples (ROMANA; TOMÁS; SERÓN, 2015).

Os sistemas de classificação surgiram no contexto de escavações subterrâneas como alternativa a procedimentos analíticos de maciços rochosos descontínuos (HACK, 1998).

Originalmente, se baseiam em procedimentos que buscam elencar, atribuir valores numéricos e pesos para fatores relevantes aos propósitos de determinados projetos (túneis, taludes, minas, etc.), de forma empírica (HACK, 1998).

De acordo com Fiori e Carmignani (2013), a análise da estabilidade de maciços rochosos para o dimensionamento de escavações e cortes de estradas de rodagem e em minas a céu aberto é a principal preocupação de muitos sistemas de classificação modernos. Em geral, os sistemas de classificação de maciços para fins de estabilidade de taludes incluem parâmetros para geometria do talude, resistência da rocha intacta, espaçamento das descontinuidades ou tamanho de blocos e parâmetros relacionados à resistência ao cisalhamento ao longo das descontinuidades (HACK; PRICE; RENGERS, 2003). Hack (1998) tece críticas a respeito da escolha de alguns destes parâmetros, abordadas a seguir no tratamento de seu próprio sistema de classificação (SSPC).

Uma avaliação da utilização de sistemas de classificação (RMR – *Rock Mass Rating*, SMR – *Slope Mass Rating* e RMS – *Rock Mass Strength*) para maciços de rochas brandas foi desenvolvida por Moon, Russel e Stewart (2001), quanto a seu valor como indicadores das condições do maciço rochoso e quanto a ângulos estáveis para taludes. Foi observado que nenhum dos sistemas estudados prediz adequadamente os ângulos dos taludes estudados (em maciços de argilitos). Análises de regressão indicaram que quando houve condições para ruptura condicionada por descontinuidades, os taludes são mais sensíveis a parâmetros de paralelismo, ângulo de mergulho e espaçamento (MOON; RUSSELL; STEWART, 2001). Além disso, observaram que quando a orientação das descontinuidades é favorável em relação ao talude, seus ângulos são mais sensíveis à resistência da rocha intacta e condições de água subterrânea. Foi concluído pelos autores, portanto, que sistemas de classificação são apropriados para utilização em rochas brandas quando as descontinuidades condicionam a ruptura (quando há descontinuidades orientadas de forma desfavorável); quando isso não ocorre, a contribuição da resistência da rocha intacta é superestimada pelos sistemas estudados. Logo, o reconhecimento da favorabilidade ou não das famílias de descontinuidades é crucial ao lidar com rochas brandas (MOON; RUSSELL; STEWART, 2001).

Da década de 1940 em diante, diversos sistemas foram desenvolvidos, mas a seguir serão introduzidos apenas os sistemas de interesse para este trabalho: RMR (*Rock Mass Rating*), desenvolvido por Bieniawski (1974), SMR (*Slope Mass Rating*), desenvolvido por Romana (1985) e SSPC (*Slope Stability Probability Classification*), desenvolvido por Hack (1998). Uma discussão mais completa a respeito dos diversos sistemas utilizados para estabilidade de taludes rochosos é apresentada por Pantelidis (2009).

2.3.1 Rock Mass Rating (RMR)

A classificação geomecânica de Bieniawski (1974), denominada RMR (*Rock Mass rating*), utiliza o RQD (*Rock Quality Designation*, índice desenvolvido por Deere *et al.*, 1967) em conjunto com

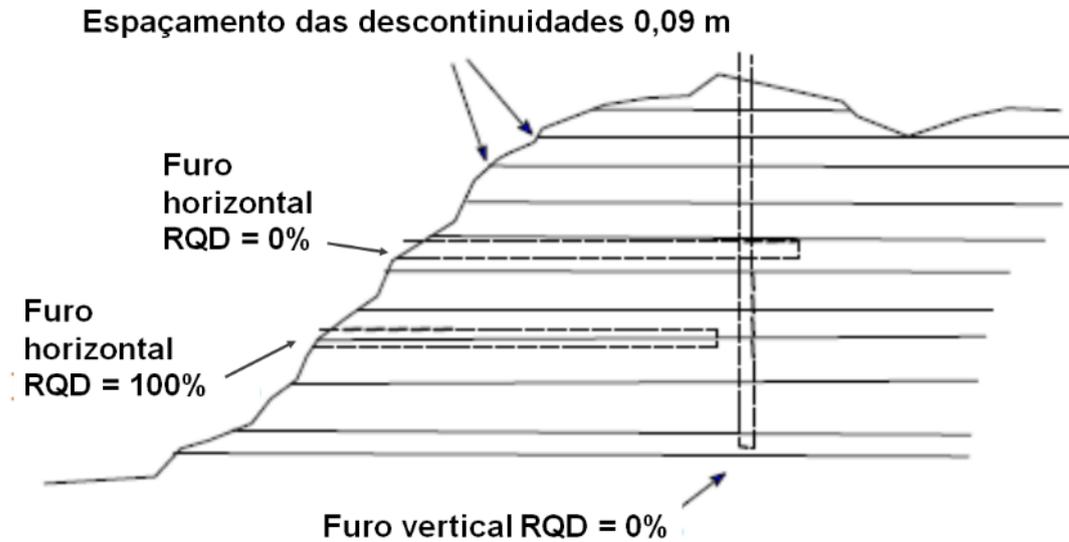
parâmetros de resistência uniaxial da rocha intacta, espaçamento, abertura, continuidade e orientação das juntas (em sentido amplo), e fluxo de água subterrânea (FIORI; CARMIGNANI, 2013). No Quadro 2, são apresentados os parâmetros de classificação e seus respectivos pesos.

A classificação RMR foi desenvolvida, principalmente, a partir de escavações subterrâneas mineiras, mas seu autor incluiu propostas para aplicá-la a fundações e taludes (TOMÁS *et al*, 2012; FIORI; CARMIGNANI, 2013), por meio de fatores de correção, que buscam quantificar a influência da orientação das descontinuidades na estabilidade.

O índice RQD se propõe a avaliar a qualidade de maciços rochosos e é base também para outros métodos empíricos de classificação de maciços rochosos (FIORI; CARMIGNANI, 2013). Originalmente baseado na recuperação de testemunhos de sondagem, ele expressa o somatório de pedaços de rocha intacta maiores que 10 cm por determinados comprimentos de sondagem. Com base neste RQD convencional, métodos para a obtenção do índice a partir de observações em afloramentos foram desenvolvidos, com destaque ao de Palmström (1982) e ao de Priest e Hudson (1976;1981), denominado RQD teórico.

Hack (1998), tece uma série de críticas a respeito da validade e do uso do índice RQD convencional, por conta da arbitrariedade da contagem de fragmentos de 10 cm, vieses decorrentes da orientação do furo de sondagem (Figura 7), por nem sempre ser fácil distinguir descontinuidades naturais de fraturas decorrentes do processo de perfuração, dentre outros. O autor conclui que a definição do RQD não é muito lógica, que os resultados podem não representar a qualidade do maciço e que a comparação de valores de RQD pode ser enganosa; portanto, questiona a incorporação do índice em sistemas de classificação. Críticas também são apresentadas em relação a sistemas que utilizam o RQD e incorporam parâmetros de espaçamento de descontinuidades, visto que isso dobra a influência do espaçamento no valor final.

Figura 7: Possível viés do RQD devido à orientação do furo de sondagem.



Fonte: modificado de Hack (2002).

Os parâmetros de classificação RMR estão apresentados no Quadro 2. O índice RMR tem valores que vão de 0 a 100 e divide os maciços rochosos em cinco classes, desde muito bom até muito pobre (Quadro 3), e fornece, ainda, uma estimativa da coesão e do ângulo de atrito interno do maciço em relação a cada uma das classes (FIORI; CARMIGNANI, 2013), conforme o Quadro 4. No entanto, Singh e Goel (2011) afirmam que embora, de fato, coesão, ângulo de atrito e módulo de deformação possam ser estimados via RMR para analisar a estabilidade de taludes rochosos, a retroanálise de taludes instáveis é uma abordagem mais confiável para a determinação dos parâmetros de resistência.

Quadro 2: Parâmetros de classificação RMR.

1	Resistência do material rochoso intacto	Resistência à compressão uniaxial (Mpa)	>250	100 a 250	50 a 100	25 a 50	5 a 25	1 a 5	<1
		Valores ponderais	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)	Valores ponderais	90 a 100	75 a 90	50 a 75	25 a 50	<25		
			20	17	13	8	3		
3	Espaçamento das descontinuidades (m)	Valores ponderais	>2	0,6 a 2	0,2 a 0,6	0,06 a 0,2	<0,06		
			20	15	10	8	5		
4	Condições das descontinuidades	Persistência (m)	< 1	1 a 3	3 a 10	10 a 20	>20		
		Valores ponderais	6	4	2	1	0		
		Abertura (mm)	Nenhuma	< 0,1	0,1 a 1	1 a 5	>5		

	Valores ponderais	6	5	4	1	0	
	Rugosidade	Muito Rugosa	Rugosa	Ligeiramente Rugosa	Ondulada	Suave	
	Valores ponderais	6	5	4	1	0	
	Preenchimento (mm)	Nenhuma	Duro <5	Duro >5	Mole <5	Mole >5	
	Valores ponderais	6	4	2	2	0	
	Alteração	Inalterada	Ligeiramente alterada	Moderadamente alterada	Muito alterada	Completamente alterada	
	Valores ponderais	6	5	3	1	0	
5	Presença de água	Condições gerais do maciço	Seco	Ligeiramente úmido	Úmido	Pingando	Fluxo abundante
		Valores ponderais	15	10	7	4	0

Fonte: Bieniawski (1989), modificado.

Quadro 3: Classes RMR conforme pontuação e descrição em termos de qualidade.

Classe RMR	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV	Classe V
Pontuação total	100 a 81	80 a 61	60 a 41	40 a 21	<20
Descrição	Muito bom	Bom	Normal	Ruim	Muito ruim

Fonte: Bieniawski (1989).

Quadro 4: Parâmetros e propriedades dos maciços rochosos conforme classificação RMR.

Parâmetro/propriedade do maciço rochoso	RMR				
	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20
	(I)	(II)	(III)	(IV)	(V)
Coesão do maciço rochoso (MPa)	>0.4	0.3 - 0.4	0.2 - 0.3	0.1 - 0.2	< 0.1
Ângulo de atrito do maciço rochoso	>45°	35 - 45°	25 - 35°	15 - 25°	< 15°
Corte seguro do talude (WALTHAM, 2002)	> 70°	65°	55°	45°	< 40°

Fonte: Singh e Goel (2011).

2.3.2 Slope Mass Rating (SMR)

O sistema *Slope Mass Rating*, introduzido por Romana (1985), foi desenvolvido com base na classificação RMR (*Rock Mass Rating*), pois esta era de aplicação quase impossível em taludes, devido à variação extrema de fatores de correção e sua falta de definição (ROMANA; TOMÁS; SERÓN, 2015). É provavelmente uma das classificações mais utilizadas no mundo (PANTELIDIS, 2009) e livros-texto significativos na área de mecânica das rochas incluem um capítulo específico para este método (e.g. Hudson e Harrison, 1997; Singh e Goel, 1999). De acordo com Romana, Tomás e Serón (2015), o SMR é incorporado nas normas técnicas de países como Itália, Estados Unidos, China e Índia. De interesse

específico desse trabalho, SMR é possivelmente a classificação geomecânica mais apropriada para a avaliação de maciços de rocha branda (MOON; RUSSELL; STEWART, 2001).

O SMR é calculado por meio da utilização de quatro fatores de correção ao RMR básico, os quais são condicionados pelo relacionamento entre as descontinuidades que afetam o maciço rochoso e o talude, e pelo método de escavação (ROMANA; TOMÁS; SERÓN, 2015). De acordo com os mesmos autores, o SMR é obtido por meio da equação:

$$SMR = RMR_B + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4 \quad (2)$$

Na qual:

- RMR_B é o índice RMR básico;
- F_1 depende do ângulo entre a direção da descontinuidade e a direção da face do talude;
- F_2 é relacionado à probabilidade da resistência ao cisalhamento da descontinuidade e depende do mergulho da descontinuidade, no caso de ruptura planar; para queda de blocos, este parâmetro recebe o valor de 1,0;
- F_3 depende da relação entre os mergulhos do talude e das descontinuidades. Este é o fator de correção original de Bieniawski e expressa a probabilidade da descontinuidade aflorar na face do talude para ruptura planar;
- F_4 é um fator de correção que depende do método de escavação.

O valor de F_1 varia de 1,00 (quando descontinuidade e talude são praticamente paralelos) a 0,15 (quando o ângulo é maior do que 30° e a probabilidade de ruptura é muito baixa). Estes valores foram obtidos empiricamente e posteriormente descobriu-se que se aproximam da seguinte relação

$$F_1 = (1 - \text{sen}A)^2 \quad (3)$$

onde A denota o ângulo entre os *strikes* da face do talude (α_s) e da descontinuidade (α_j), ou seja ($\alpha_s - \alpha_j$)(SINGH; GOEL, 1999).

O valor de F_2 varia de 1,00 (para descontinuidades que mergulham mais que 45°) a 0,15 (para descontinuidades que mergulham menos que 20°). Também obtido empiricamente, se aproxima da relação

$$F_2 = \tan^2\beta_j \quad (4)$$

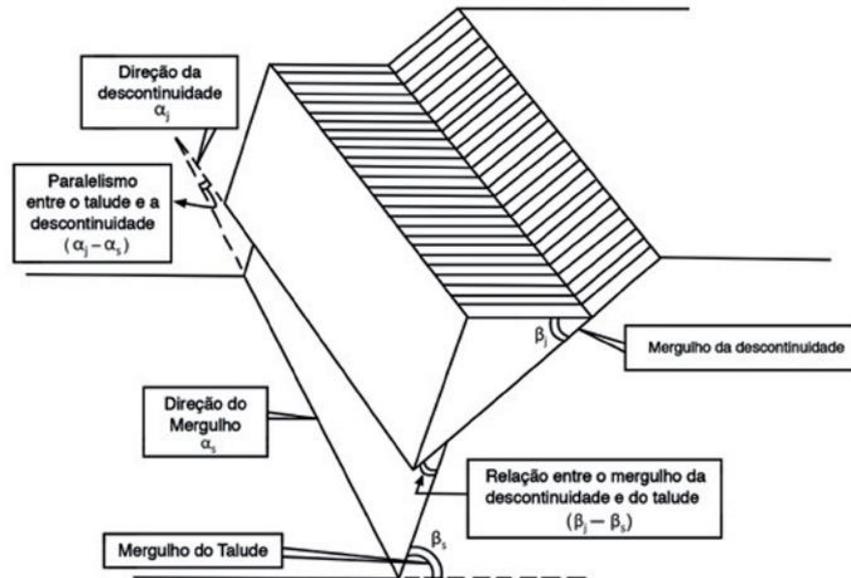
onde β_j denota o ângulo de mergulho da descontinuidade (SINGH; GOEL, 1999).

O fator F_3 indica condições favoráveis quando a face do talude e as juntas são paralelas. Se o

talude mergulha mais que 10° que as discontinuidades, as condições são consideradas “muito desfavoráveis”. Para tombamento de blocos, condições desfavoráveis dependem da soma dos mergulhos das discontinuidades e do talude $\beta_j + \beta_s$ (SINGH; GOEL, 1999).

No desenho esquemático na Figura 8, é possível observar as relações angulares das quais os fatores de correção apresentados são extraídos.

Figura 8: Modelo de ruptura planar com os ângulos β_j , β_s , α_j e α_s .



Fonte: Singh e Goel (1999), traduzido por Soares, Pissato e Lima (2016).

O fator F_4 pode assumir cinco valores, correspondentes às classes: talude natural, pré-corte, detonação suave, detonação normal ou escavação mecânica e detonação deficiente (Quadro 5).

Quadro 5: Valores de ajuste para F_4 .

Método de escavação	Valor de F_4
Talude natural	+15
Pré-corte	+10
Detonação suave	+8
Detonação normal ou escavação mecânica	0
Detonação deficiente	-8

Fonte: Romana (1985).

O valor de SMR indica a possibilidade de rupturas similares a de solos (normalmente para valores baixos) e a quantidade de rupturas planares e em cunha (normalmente para valores mais altos); o valor de SMR também indica medidas de suporte a serem tomadas para taludes parcialmente instáveis (HACK, 1998). O Quadro 6 correlaciona a classe SMR com o tipo de ruptura e propõe formas de

contenção do talude.

Quadro 6: Classe do SMR associada com seu respectivo valor, estabilidade do talude, possíveis rupturas e contenção sugerida.

Classe	Valor do SMR	Descrição	Estabilidade	Ruptura	Contenção
I	81-100	Excelente	Totalmente estável	Nenhuma	Nenhuma
II	61-80	Boa	Estável	Alguns blocos	Ocasional
III	41-60	Razoável	Parcialmente estável	Poucas formações de cunha	Sistemática
IV	21-40	Ruim	Instável	Planar e cunhas grandes	Corretiva
V	0-20	Muito ruim	Totalmente instável	Planares grandes, comporta-se como solo	Reescavação

Fonte: Romana (1985).

Houve interessantes desenvolvimentos no sistema de classificação SMR, desde sua apresentação, com destaque a duas formas de aplicação. Tomás *et al.* (2012), desenvolveram um método gráfico baseado na representação estereográfica das descontinuidades e do talude para a obtenção dos parâmetros de correção do SMR (ROMANA; TOMÁS; SERÓN, 2015). Outra ferramenta desenvolvida para a obtenção dos parâmetros de correção do SMR foi um *software* de livre acesso, *SMRTool beta*, publicado por Riquelme *et al.* (2014), que também calcula os tipos de ruptura compatíveis com o caso de estudo (ROMANA; TOMÁS; SERÓN, 2015). Pastor *et al.* (2019) detalham a utilização e funcionamento do *software*. Em sua dissertação, Assis (2016) desenvolveu um aplicativo para dispositivos móveis destinado ao cálculo do SMR, disponível na *Google Play Store*.

Uma publicação com objeto de estudo relacionado ao deste trabalho, estabilidade de taludes em rocha branda, foi publicada por Calcaterra, Gilli e Iovinelli (1998). Os autores utilizaram a classificação SMR na avaliação de 16 taludes de ardósia intensamente alterados em uma área localizada a noroeste de Barcelona (Espanha). De acordo com a classificação conduzida pelos autores, 80% dos taludes de corte na área caíram nas classes IV e V, que identificam encostas instáveis ou completamente instáveis. Foi concluído que os resultados da classificação SMR correspondem bem com as condições de estabilidade observadas, e que, portanto, este método pode ser considerado uma ferramenta adequada para este tipo de estudo.

No Brasil, uma aplicação recente do método gráfico de obtenção de SMR foi realizada por Soares, Pissato e Lima (2016). Este trabalho, realizado na mina de Santa Luz (BA), consistiu na avaliação de seis taludes por meio de análise cinemática, RMR, SMR e sistema Q (Barton, 1974). As litologias presentes na mina são metamórficas: metadacitos, metadioritos, xistos carbonosos, brechas dacíticas e brechas carbonosas. As classificações RMR e SMR apresentaram resultados similares, a maioria dos taludes foi classificada como razoável em ambos os sistemas. O sistema Q apresentou resultados mais conservadores, visto que o RMR prioriza a qualidade da rocha, enquanto o Q considera mais importante o número de famílias de descontinuidades e suas condições (SOARES; PISSATO; LIMA, 2016).

Em contexto catarinense, uma aplicação recente da classificação SMR foi realizada por Niehues (2019), que avaliou dois taludes de granito em uma obra viária na região metropolitana de Florianópolis. No trabalho elaborado por Niehues (2019), foi feita inicialmente uma avaliação por análise cinemática e depois a classificação SMR dos taludes, que se localizam em duas margens opostas da rodovia. O contexto climático é muito similar ao de Gaspar, porém, a geologia difere consideravelmente.

2.3.3 Slope Stability Probability Classification (SSPC)

O sistema *Slope Stability Probability Classification*, introduzido por Hack (1998) se baseia em uma abordagem em três etapas e na avaliação probabilística de mecanismos de ruptura diferentes e independentes em um talude (HACK; PRICE; RENGERS, 2003). Algumas das críticas do autor em relação a outros sistemas e seus parâmetros já se infiltraram em discussões anteriores neste trabalho; é com base em insatisfações como as mencionadas que o método foi desenvolvido. Um dos objetivos da confecção do sistema foi eliminar parâmetros relacionados a escavações subterrâneas, legado herdado dos sistemas de classificação iniciais, que tinham o *design* subterrâneo como meta (HACK, 2002).

Hack, Price e Rengers (2003) afirmam que as propriedades das descontinuidades devem ser incluídas em cálculos de projetos de engenharia que envolvem maciços rochosos; no entanto, variações nestas propriedades podem ser consideráveis mesmo ao longo de um mesmo plano de descontinuidade. Os autores prosseguem: como pode haver centenas de descontinuidades em um maciço, cada uma com suas propriedades variáveis, estas, em conjunto com não-homogeneidades no material rochoso, requerem uma grande quantidade de dados para que o comportamento mecânico possa ser descrito ou calculado com acurácia. Ensaio de laboratório ou de campo podem ser utilizados para a obtenção dos parâmetros, no entanto, ensaiar em grandes quantidades consome muito tempo e demais recursos.

A ausência de considerações fundamentais na avaliação da segurança de um talude, como expressões de incerteza no estabelecimento das propriedades do maciço rochoso e de sua variação (HACK; PRICE; RENGERS, 2003), foi um dos fatores motivantes ao desenvolvimento do sistema.

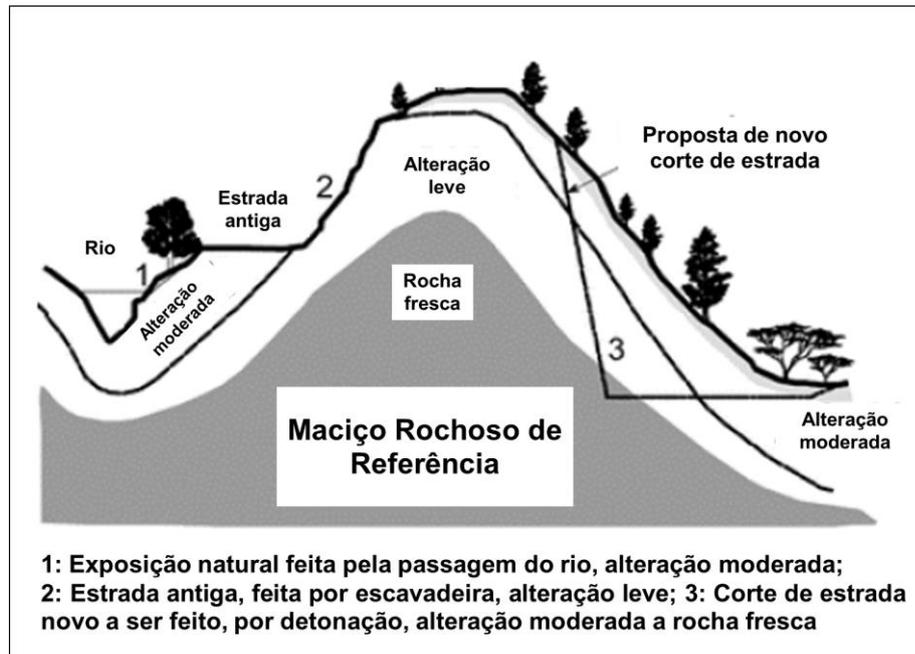
Na mesma linha, a avaliação probabilística de estabilidade de taludes progressivamente ganha popularidade devido a dificuldades em atribuir os valores mais apropriados aos parâmetros do projeto em métodos numéricos ou analíticos (CANAL; AKIN, 2016).

De acordo com Hack, Price e Rengers (2003), as prioridades no desenvolvimento do SSPC foram: 1) a introdução do princípio de classificação em três etapas para descrever maciço exposto, maciço de referência e maciço do talude (mais detalhes a seguir); 2) a avaliação de estabilidade via determinação da probabilidade de ocorrência de mecanismos de ruptura diferentes ao invés de um valor de classificação pontual; e 3) procedimentos simples e não ambíguos para a coleta de dados em campo.

A utilização dos conceitos: maciço exposto, maciço de referência e maciço do talude se refere

a três diferentes condições de maciço (Figura 9). O maciço exposto é observado diretamente no afloramento de uma encosta. O maciço de referência é um maciço imaginário, não perturbado e fresco/são, nas condições pré-escavação. O maciço do talude é o talude existente ou a ser escavado (HACK, 1998).

Figura 9: Esboço de exposições de maciços rochosos com variáveis graus de alteração e diferentes tipos de escavação, com indicação do conceito de maciço de referência.



Fonte: Hack, Price e Rengers (2003), modificado.

As análises de estabilidade executadas via SSPC se relacionam à estabilidade dependente de orientações e à estabilidade independente de orientações, termos já inseridos anteriormente nas partes iniciais desta revisão. Os parâmetros de entrada para a classificação e análises incluem fatores de: resistência da rocha intacta, método de escavação, alteração, orientação das descontinuidades, espaçamento, persistência, rugosidade em pequena e grande escala, preenchimento, carste e suscetibilidade à alteração (HACK; PRICE; RENGERS, 2003).

A abordagem proposta por Hack (1998) para obtenção dos parâmetros de resistência da rocha intacta, assim como suas críticas à forma de obtenção e utilização deste fator em outros sistemas merecem ser apresentadas neste trabalho. Com frequência, os valores de resistência da rocha intacta são obtidos via ensaios laboratoriais de compressão uniaxial. As críticas quanto a isso: 1) as amostras costumam ter 10 cm de comprimento: se o espaçamento das descontinuidades for menor, pode haver descontinuidades no centro do corpo; 2) amostras ensaiadas em laboratório costumam ser de maior qualidade do que a rocha média investigada, pois rocha frágil é desconsiderada quando testemunhos ou amostras quebram; 3) a resistência da rocha intacta depende da orientação da amostra, se a rocha apresentar anisotropia; 4) a compressão uniaxial não é um parâmetro válido, pois a maioria das rochas

estará, na realidade, em condições de tensão análogas às de ensaios triaxiais, não uniaxiais. O último ponto é controverso, principalmente em casos cuja tensão no maciço é baixa.

Alguns sistemas recomendam a utilização de ensaios de carga pontual, no entanto, os mesmos problemas do ensaio de compressão uniaxial se aplicam (HACK, 1998). Quanto ao uso do martelo de Schmidt, há grande desvantagem quanto à influência de descontinuidades atrás da superfície testada (HACK, 1998).

Quanto à utilização dos parâmetros de resistência da rocha intacta nos sistemas de classificação aplicados à estabilidade de taludes, Hack (1998) afirma que a importância deste parâmetro na governança da estabilidade de taludes diminui conforme a resistência da rocha intacta aumenta e que grandes acurácias no estabelecimento deste parâmetro não são necessárias. Esta importância limitada remove a necessidade da execução de testes sofisticados, portanto, testes de fácil execução em campo (marteladas, testes de dureza, moldagem, quebra manual, etc. – Quadro 7) fornecem valores adequados para fins de avaliação de estabilidade de taludes (HACK, 1998).

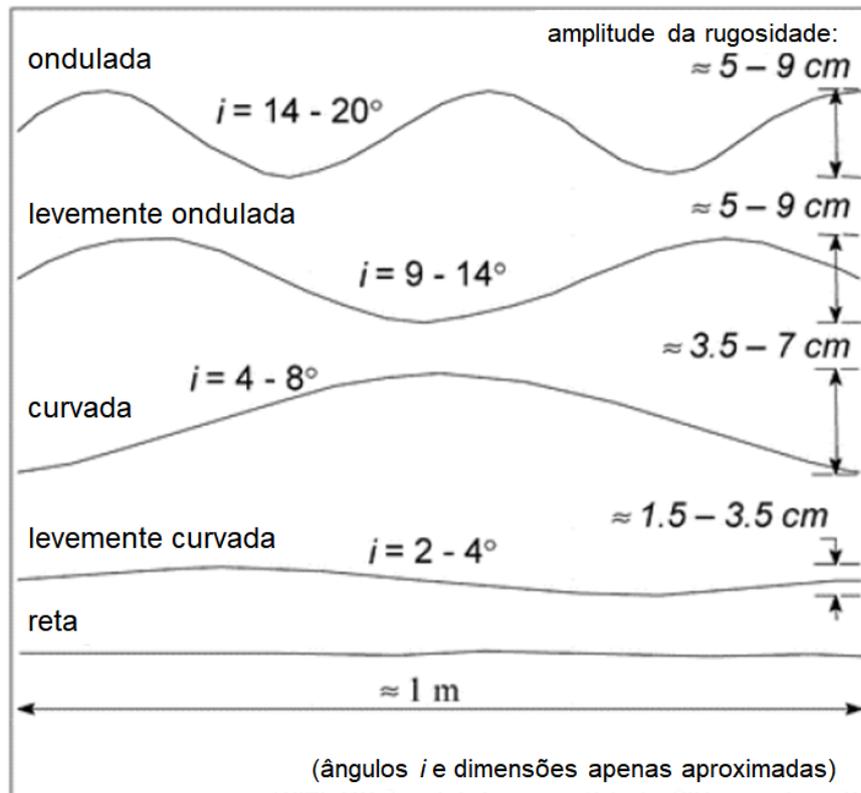
Quadro 7: Estimativas de resistência da rocha intacta.

Resistência da rocha intacta	Teste de “meios simples” (martelo geológico padrão de cerca de 1kg)
< 1,25 MPa	Esfarela na mão
1,25 - 5 MPa	Lascas finas se quebram facilmente nas mãos
50 - 12,5 MPa	Lascas finas quebram por forte pressão manual
12,5 – 50 MPa	Pedaços quebram com marteladas leves
50 – 100 MPa	Pedaços quebram com marteladas pesadas
100 – 200 MPa	Pedaços apenas lascam com marteladas pesadas
> 200 MPa	Rochas badalam a marteladas. Faíscas voam.

Fonte: Hack (1998).

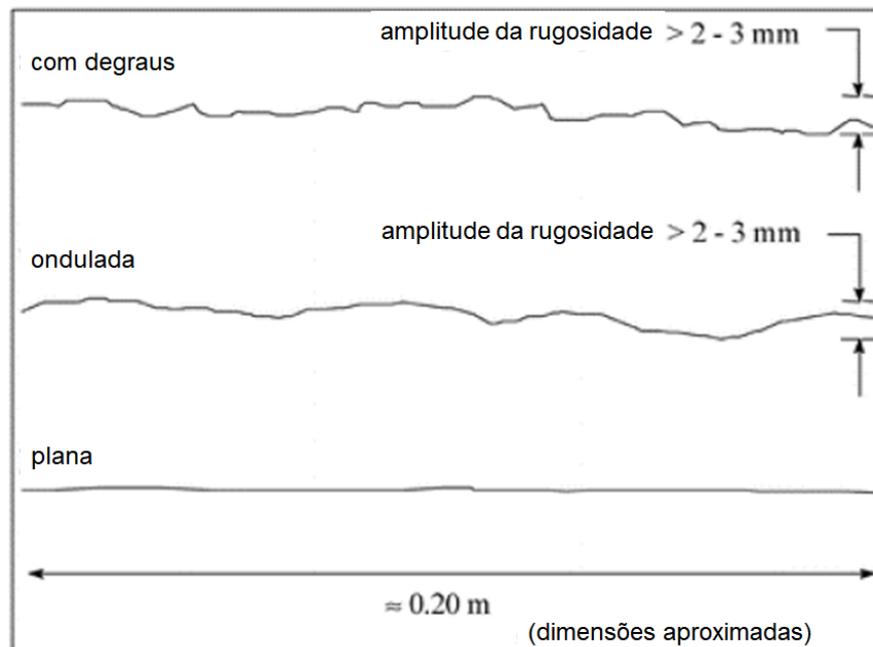
O sistema SSPC também tem seus gabaritos próprios para levantamento de rugosidade em escala grande e escala pequena, conforme a Figura 10 e a Figura 11.

Figura 10: Perfis de rugosidade em escala grande.



Fonte: modificado de Hack (1998).

Figura 11: Perfis de rugosidade em escala pequena.



Fonte: modificado de Hack (1998).

Uma grande desvantagem do sistema SSPC é a incapacidade de analisar a probabilidade de rupturas em cunha; além disso, o efeito da água subterrânea na resistência ao cisalhamento das descontinuidades é negligenciado no sistema (CANAL; AKIN, 2016), ainda que Hack, Price e Rengers (2003) tenham dado justificativas para tal.

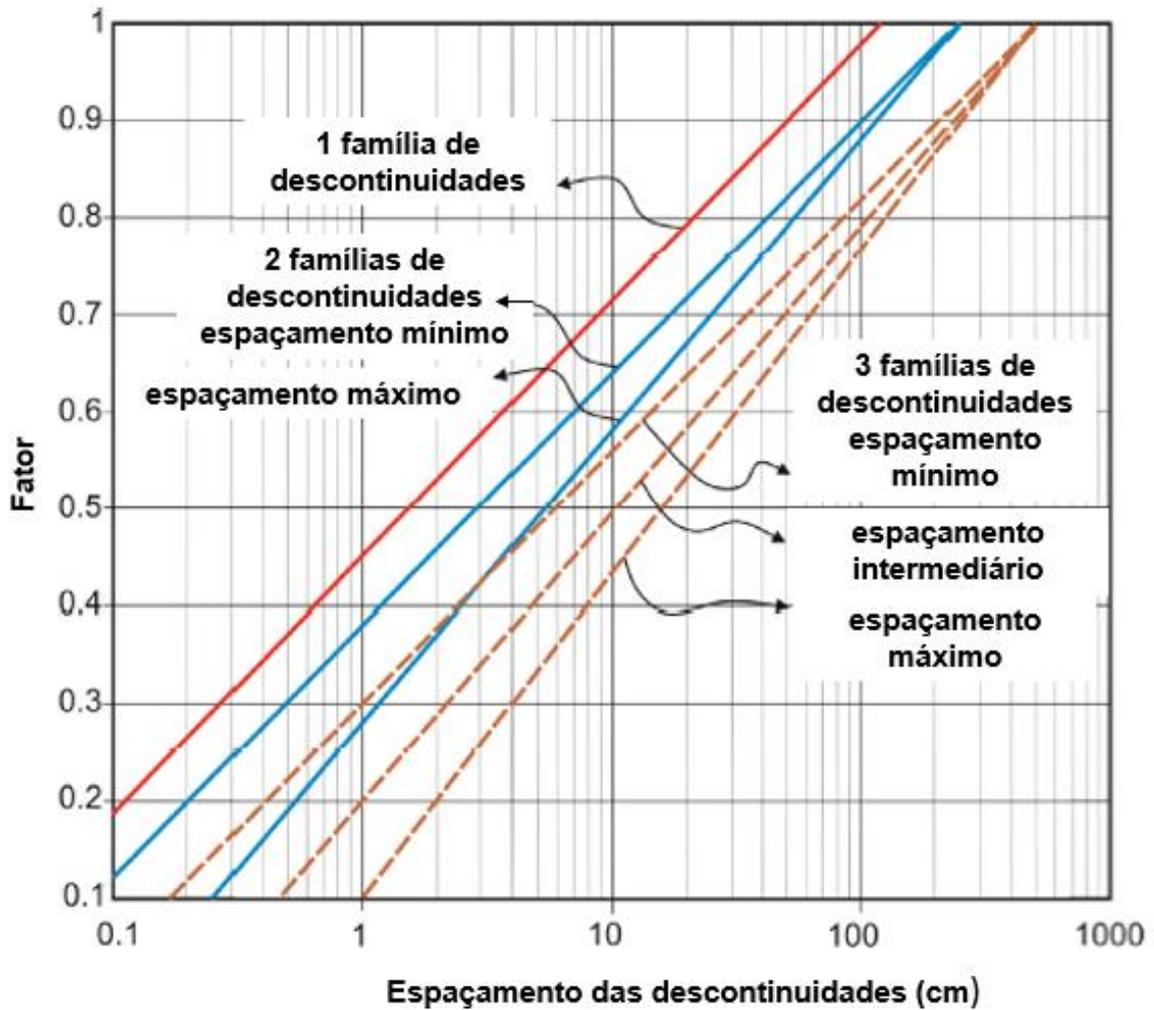
De acordo com os desenvolvedores, pressões d'água nas descontinuidades são tradicionalmente consideradas de grande importância na estabilidade de taludes rochosos; no entanto, exames mais rigorosos indicam que, em geral, isto deve ser considerado duvidoso para muitos maciços. Eles prosseguem, argumentam que a maioria dos maciços próximos à superfície contém muitas descontinuidades, que geralmente permitem que água flua livremente para fora do maciço em um corte de talude, enquanto a cobertura de solo acima reduz a taxa de infiltração, por ser geralmente menos permeável que o maciço. Portanto, sugerem que isso inibe qualquer incremento grande de pressões d'água. Este posicionamento é controverso e talvez não se aplique ao contexto climático da região de estudo. De acordo com Singh e Goel (2011), a classificação SSPC precisa ser testada em outras condições climáticas que não as das regiões montanhosas da Europa (onde foi desenvolvida e nas quais tem se popularizado), como nos Himalaias e na Índia; nesse contexto, as condições de umidade governam a estabilidade de muitas encostas, que são estáveis no verão e rompem no inverno devido a fortes chuvas ou congelamento – as piores condições referentes a água devem ser adotadas.

Após o levantamento dos parâmetros das descontinuidades e do talude, determina-se fatores para o cálculo da estabilidade. A seguinte descrição da obtenção dos fatores é baseada em Hack (1998), a não ser que se explicita o contrário. A resistência da rocha intacta de referência (fator RIRS – *Reference Intact Rock Strength*) é calculada por meio da divisão da resistência da rocha intacta (IRS - *Intact Rock Strength*) pelo fator de intemperização (WE – *Weathering Degree Factor*).

$$RIRS = IRS/WE \quad (5)$$

O espaçamento de referência das descontinuidades (RSPA – *Reference discontinuity spacing*) é determinado para as famílias de descontinuidades. Antes disso, é necessário obter três fatores de correção, por meio do gráfico na Figura 12.

Figura 12: Gráfico de determinação de fatores de acordo com espaçamento.



Fonte: modificado de Hack (1998).

Então, RSPA é calculado pela divisão do fator SPA pelos fatores WE (intemperização) e ME (fator relacionado ao método de escavação), conforme a equação:

$$RSPA = SPA / (WE \times ME) \quad (6)$$

O cálculo do fator SPA se dá da seguinte forma:

$$SPA = (Fator\ 1) \times (Fator\ 2) \times (Fator\ 3) \quad (7)$$

O Fator de Condição (TC) de uma descontinuidade é calculado por meio da multiplicação dos fatores de rugosidade de grande escala (Rl), rugosidade de pequena escala (Rs), preenchimento (Im) e carste (Ka).

$$TC = Rl \times Rs \times Im \times Ka \quad (8)$$

O fator de condição do maciço de referência (RTC) é definido de acordo com a equação abaixo, que considera o fator de intemperização (WE):

$$RTC = TC / (1,452 - 1,220 \times e^{-WE})^{0,5} \quad (9)$$

Calcula-se, então, o fator de condição ponderado (CD), com uso dos fatores TC e DS (espaçamento das descontinuidades), por meio da seguinte fórmula:

$$CD = \frac{\frac{TC_1}{DS_1} + \frac{TC_2}{DS_2} + \frac{TC_3}{DS_3}}{\frac{1}{DS_1} + \frac{1}{DS_2} + \frac{1}{DS_3}} \quad (10)$$

O fator de condição da descontinuidade de referência (RCD) é estimado por meio da seguinte equação:

$$RCD = CD / WE \quad (11)$$

Com estes fatores é possível determinar a probabilidade de estabilidade. A estabilidade dependente de orientação é calculada por meio da relação entre os fatores STC (condição da descontinuidade) e AP (ângulo aparente entre o mergulho do plano de descontinuidade na direção do mergulho do talude). O fator AP é calculado da seguinte forma:

$$AP = \arctan (\cos \delta \times \tan \beta_j) \quad (12)$$

Na qual δ expressa a diferença das direções de mergulho do talude e da descontinuidade ($\delta =$ direção do talude – direção de mergulho da descontinuidade) e β_j representa o mergulho da descontinuidade.

Por meio do fator AP, é possível definir uma condição de estabilidade inicial, análoga a uma análise cinemática (Quadro 8).

Quadro 8: Análise dependente de orientação no sistema SSPC.

Condições	Orientação da descontinuidade	Ruptura planar	Tombamento de blocos
$AP > 84^\circ$ ou $AP < -84^\circ$	vertical	100%	100%
$(\text{mergulho do talude} + 5^\circ) < AP < 84^\circ$	acompanha	100%	100%
$(\text{mergulho do talude} - 5^\circ) < AP < (\text{mergulho do talude} + 5^\circ)$	igual	100%	100%
$0 < AP < (\text{mergulho do talude} - 5^\circ)$	acompanha	Planar*	100%
$AP < 0^\circ$ e $(-90^\circ - AP + \text{mergulho do talude}) < 0^\circ$	contrária	100%	100%
$AP < 0^\circ$ e $(-90^\circ - AP + \text{mergulho do talude}) > 0^\circ$	contrária	100%	Tombamento de blocos**

Nota: *Usar diagrama de probabilidade de ruptura planar; **Usar diagrama de probabilidade de tombamento de blocos.

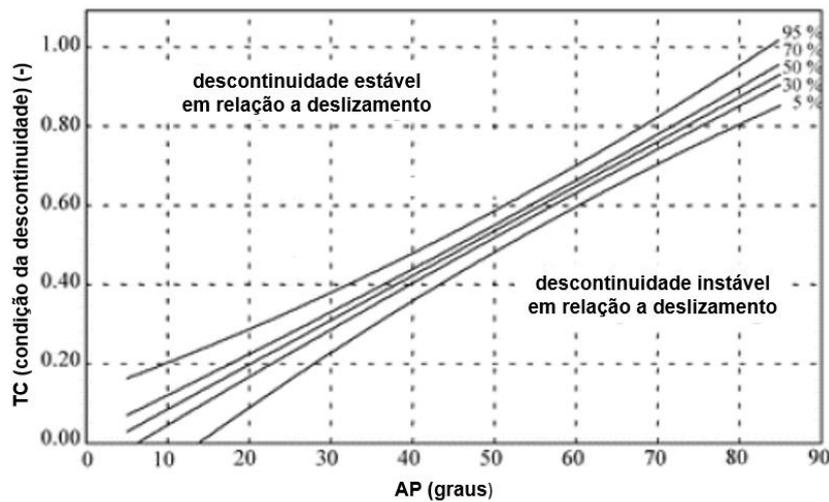
Fonte: Hack (1998).

O Quadro 8 indica condições para análise adicional para casos de ruptura planar e queda de blocos. Para tanto é necessário calcular a condição de descontinuidades do talude (STC – *discontinuity condition of the slope*). Este fator é função do parâmetro RTC e do fator de intemperização do talude no tempo de engenharia (SWE):

$$STC = RTC \times (1,452 - 1,220 \times e^{SWE})^{0,5} \quad (13)$$

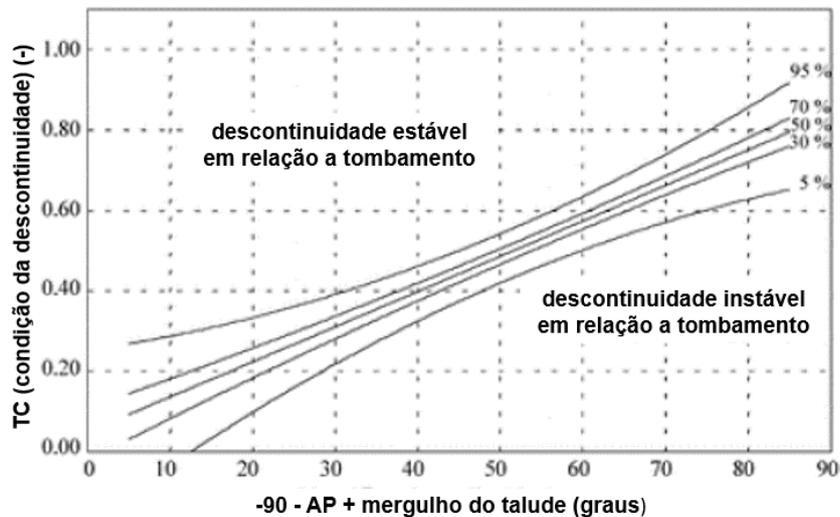
A análise adicional envolve a plotagem dos fatores STC e AP em gráficos para ruptura planar (Figura 13) e para tombamento de blocos (Figura 14).

Figura 13: Critério para ruptura planar.



Fonte: modificado de Hack (1998).

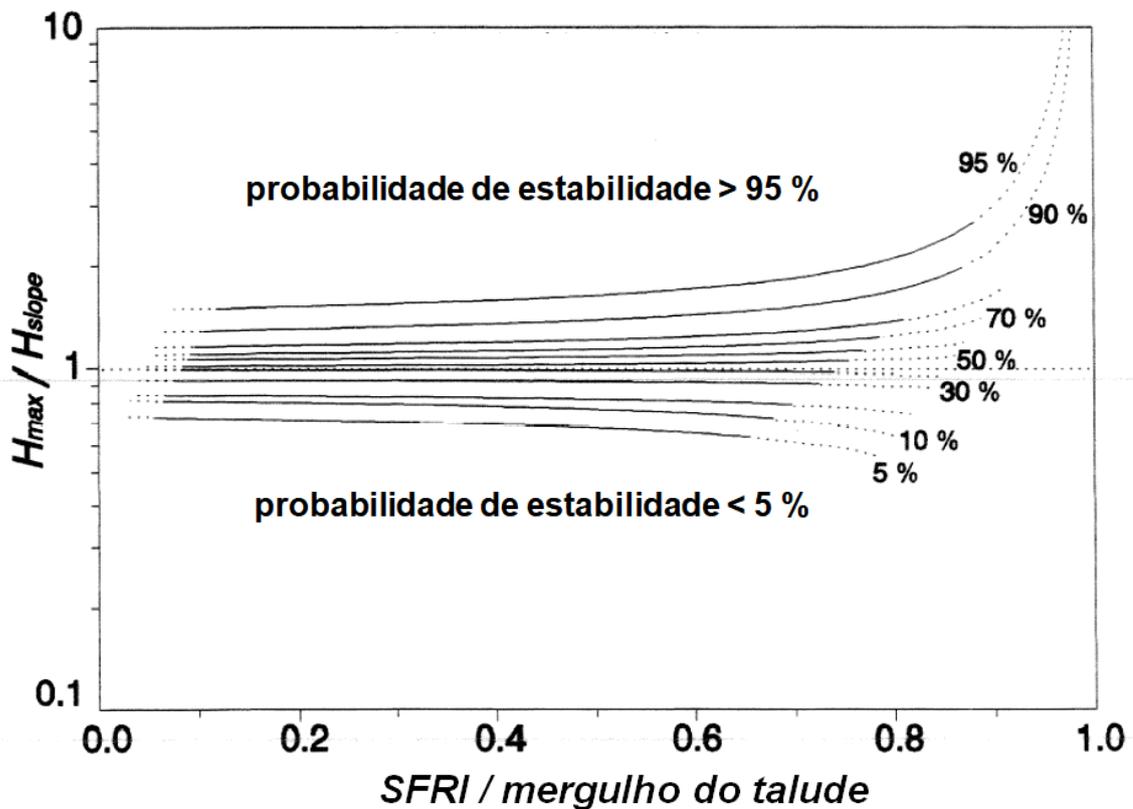
Figura 14: Critério para tombamento de blocos.



Fonte: modificado de Hack (1998).

Quanto à avaliação de estabilidade independente de orientação, a avaliação SSPC utiliza os parâmetros de resistência da rocha intacta do talude (SIRS), alteração do talude (SWE), espaçamento das descontinuidades do talude (SSPA) e fator SCD (condição das descontinuidades do talude). Por meio desses, é possível obter o ângulo de atrito e a coesão do talude (SFRI e SCOH, respectivamente), dois parâmetros que permitem que a altura máxima do talude seja calculada (H_{max}). Assim, com estes fatores calculados, a análise é feita por meio do gráfico apresentado na Figura 15.

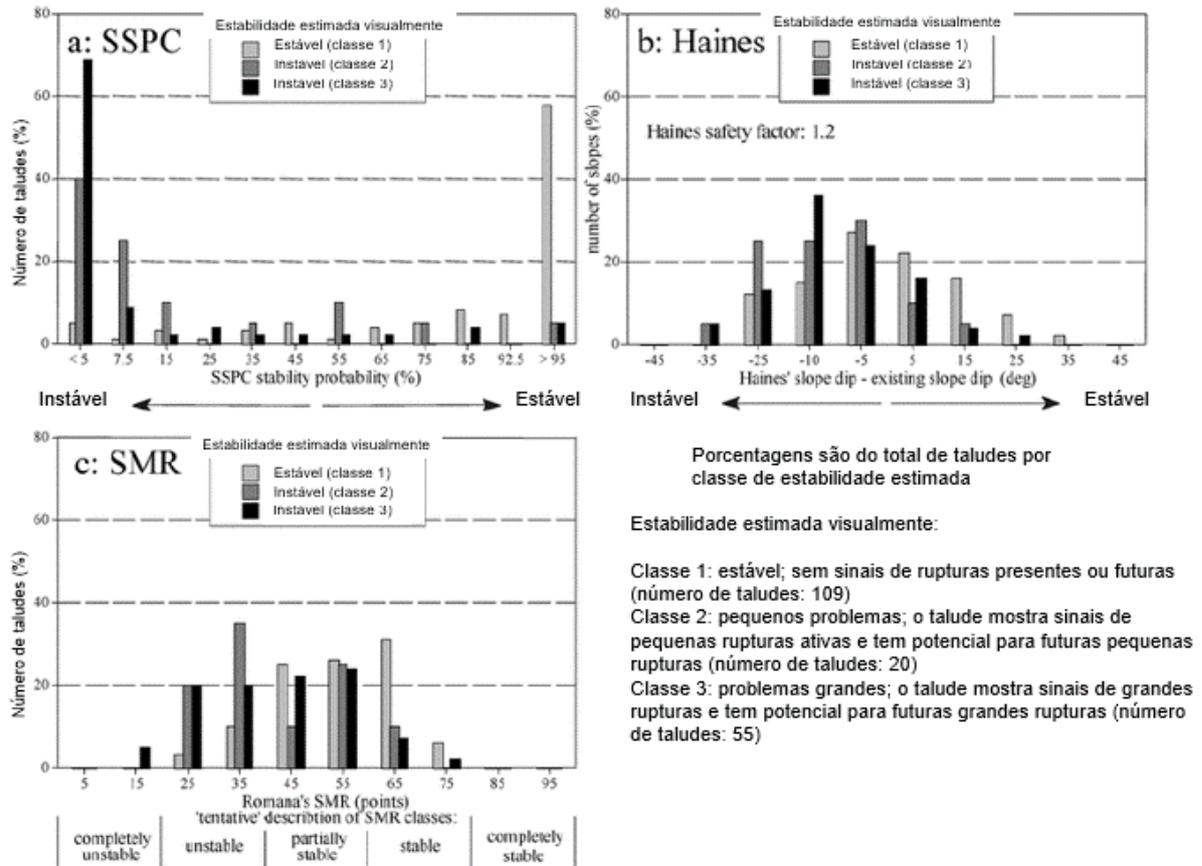
Figura 15: Gráfico de probabilidade de estabilidade independente de orientação.



Fonte: modificado de Hack (1998).

Hack (1998) aplicou seu método em 184 taludes no nordeste da Espanha. Foram feitas comparações com outros dois sistemas: o de Haines, desenvolvido por Haines e Terbrugge (1991); e SMR. O cálculo da estabilidade via SSPC fornece uma diferenciação mais distinta entre condições estáveis e instáveis. A correlação entre estabilidades estimadas visualmente e os resultados de estabilidade do sistema SSPC também é mais robusta do que nos outros sistemas (Figura 16).

Figura 16: Comparação de avaliações de estabilidade em diferentes sistemas.



Fonte: modificado de Hack (1998).

Um extenso estudo de estabilidade de taludes rochosos foi realizado por Canal e Akin (2016), em uma estrada na região oriental da Turquia. Um total de sete altos (15-30m) e íngremes (50°-90°) cortes de estrada em calcário foram avaliados. Análises cinemáticas foram executadas inicialmente, de forma a balizar os resultados obtidos via SSPC. A investigação foi composta por análises dependentes de orientação (Quadro 9) e por análises independentes de orientação (Quadro 10). Em ambos os casos, taludes rochosos avaliados são suscetíveis a problemas de estabilidade.

Quadro 9: Probabilidades de estabilidade dependente de orientação nas discontinuidades investigadas por Canal e Akin (2016).

Local	Descontinuidade	STC	AP	Tipo de ruptura potencial	Probabilidade de estabilidade (%)
1	S1	0.39	18.83	Planar	100
	S2	0.39	-46.93	Tombamento	90
	S3	0.39	77.25	-	100
2 - baixa	S1	0.39	72.58	Planar	<5
	S2	0.39	-25.86	Tombamento	100
	S3	0.39	21.48	Planar	100
2 - alta	S1	0.44	1.00	Planar	100
	S2	0.44	63.59	Planar	<5
	S3	0.44	-15.84	Tombamento	100
3	S1	0.44	-1.66	-	100
	S2	0.44	-63.97	Tombamento	<5

Local	Descontinuidade	STC	AP	Tipo de ruptura potencial	Probabilidade de estabilidade (%)
4	S3	0.44	57.90	Planar	<5
	S1	0.44	24.88	Planar	100
	S2	0.44	-57.40	Tombamento	100
	S3	0.44	68.68	-	100
5	S1	0.44	85.43	-	100
	S2	0.44	12.99	Planar	100
	S3	0.44	-46.29	Tombamento	80
6	S1	0.44	-60.26	Tombamento	<5
	S2	0.44	-85.76	Tombamento	<5
	S3	0.44	28.57	Planar	100
7	S1	0.44	36.48	Planar	100
	S2	0.44	56.85	Planar	<5
	S3	0.44	-44.56	Tombamento	100

Fonte: Canal e Akin (2016).

Quadro 10: Probabilidades de estabilidade independente de orientação nas descontinuidades investigadas por Canal e Akin (2016).

Local	Altura do talude (m)	ϕ SRM (°)	H _{máx} (m)	ϕ SRM (°)/Mergulho do talude	H _{máx} (m)/Altura do talude	Probabilidade de estabilidade
1	15	13.4	1.9	0.2	0.1	<5
2 - baixa	15	15.2	1.7	0.2	0.1	<5
2 - alta	15	60.3	26.9	0.7	1.8	93
3	20	32.7	6.6	0.4	0.3	<5
4	20	23.2	8.5	0.4	0.4	<5
5	25	45.5	11.2	0.5	0.5	<5
6	30	50.9	15.1	0.6	0.5	<5
7	20	36.6	13.2	0.5	0.7	5

Fonte: Canal e Akin (2016).

Outro estudo relativamente recente realizado na Turquia foi conduzido por Karaman, Ercikdi e Kesimal (2013), referente a três taludes rochosos em uma lavra de calcário. A análise via SSPC foi combinada com análise via SMR e análise cinemática, de forma que há base para comparação das diferentes abordagens. Foram executadas análises probabilísticas para estabilidade dependente e independente de orientação. Os resultados da classificação dependente de orientação tiveram concordância considerável com os obtidos via análises cinemática, exceto para um dos taludes. A classificação SMR acusou encostas parcialmente estáveis (algumas juntas e muitas rupturas em cunha). De acordo com os autores, o sistema SSPC produz uma diferenciação mais distinta entre condições estáveis e instáveis. A maior diferença reside na análise independente de orientação do sistema desenvolvido por Hack (1998), que leva em consideração a altura do talude e alteração futura, fatores não abordados pela classificação SMR. A análise independente de orientação demonstrou que os taludes têm uma probabilidade de estabilidade $\geq 80\%$, o que permitiu definir alturas máximas para os cortes.

Hack (2002), ao se deparar com a pergunta “qual é o melhor sistema?”, declara que cada desenvolvedor tem a tendência de responder que seu sistema é o melhor, e que no entanto, é necessário reconhecer que sistemas mais novos tendem a ser melhores pois são desenvolvidos com base nas experiências adquiridas com sistemas mais antigos.

2.4 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

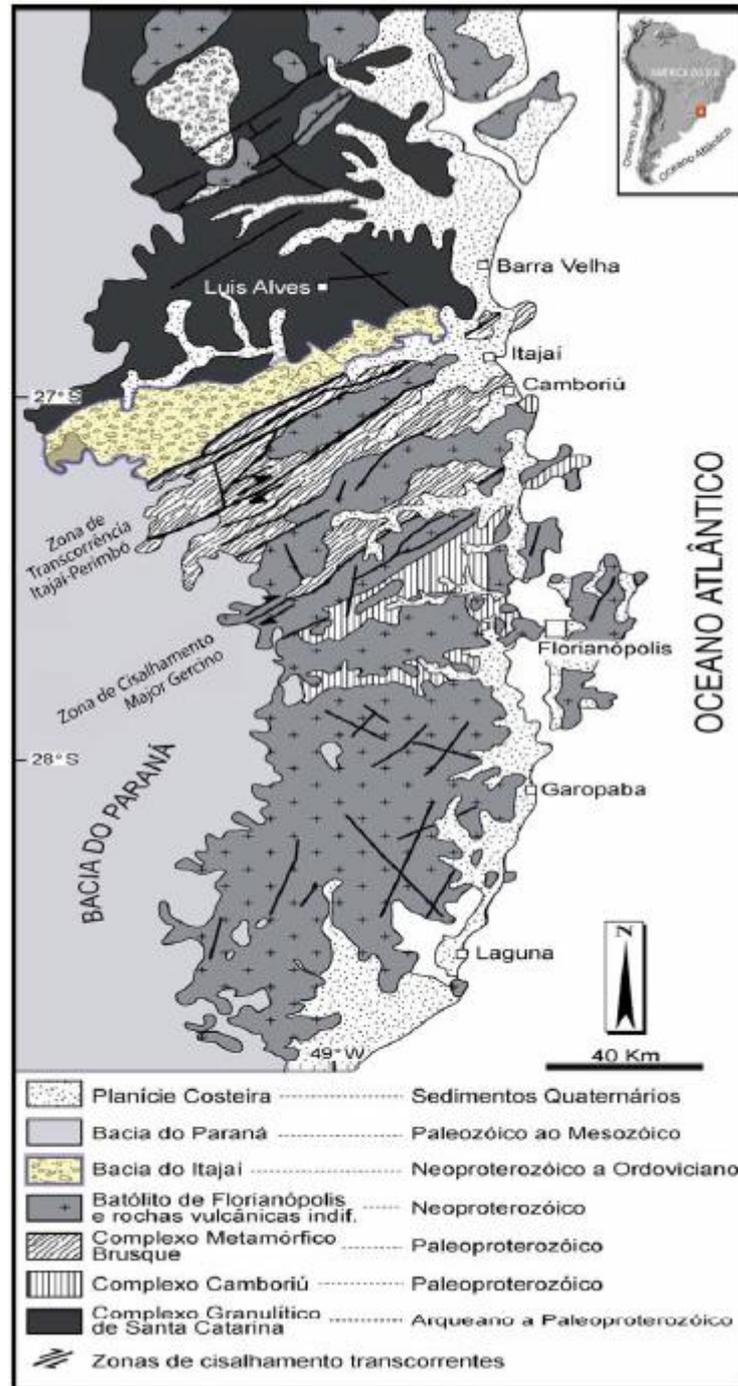
Os trabalhos de campo e laboratório realizados nas rochas do talude estudado foram executados com vistas a caracterizá-las e elucidar os fatores que podem contribuir para seu comportamento mecânico, ou seja, não tiveram como objetivo investigar fatores evolutivos das rochas em estudo. Portanto, o contexto geológico regional a seguir apresentado é proveniente apenas de compilação bibliográfica.

O maciço rochoso deste estudo se localiza no contexto da Bacia do Itajaí (BI), uma bacia vulcanossedimentar depositada ao final do neoproterozoico (BASEI *et al.*, 2011; COSTA, 2014; SHROEDER, 2006). De acordo com Almeida *et al.* (2010), a Bacia do Itajaí faz parte de um conjunto de bacias ediacaranas que ocorre do sul do Uruguai ao sul do estado de Minas Gerais, em um sistema de mais de 1500 km de extensão, com *trend* NE.

Inserida no Escudo Catarinense, entre rochas de idade pré-cambriana, a Bacia do Itajaí faz contato a norte com rochas do Complexo Granulítico de Santa Catarina (também conhecido como Complexo Luís Alves), a sul, com o Complexo Metamórfico Brusque (ou Grupo Brusque), a oeste, apresenta-se recoberta por rochas da Bacia do Paraná, e a leste, por sedimentos quaternários fluviais e marinhos (SCHROEDER, 2006), conforme a Figura 17. De acordo com Basei *et al.* (2011), a BI foi depositada entre 600 e 560 Ma (final do neoproterozoico), composta por uma espessa sequência de rochas sedimentares com marcada contribuição turbidítica e afetada por importantes eventos de atividade vulcânica félsica. Ainda de acordo com o mesmo autor, a bacia ocupa uma área de cerca de 700 km² e se estende por mais de 80 km; tem forma assimétrica, alongada aproximadamente na direção N60E, com formato de um prisma sigmoide.

As propostas de estratigrafia para a BI são variadas e controversas. Nesta revisão, para a contextualização regional, optou-se por apresentar o mapa (Figura 18), as seções geológicas (Figura 19) e coluna estratigráfica (Figura 20) desenvolvidos por Basei *et al.* (2011), um trabalho relativamente recente e bem construído, que sintetiza informações coletadas na BI ao longo dos 20 anos anteriores. No entanto, a fonte com dados mais locais disponível consiste no mapa geológico de Santa Catarina, elaborado em escala 1:500.000 por Wildner *et al.* (2014), para o Serviço Geológico do Brasil – CPRM, motivo pelo qual, apesar das divergências estratigráficas, se optou também por apresentá-lo, de forma a contextualizar melhor a geologia do entorno do talude (Figura 21).

Figura 17: Mapa geológico do Escudo Catarinense.



Fonte: Chemale Jr. *et al.* (2003), modificado por Schroeder (2006).

Figura 18: Mapa geológico da Bacia do Itajaí.

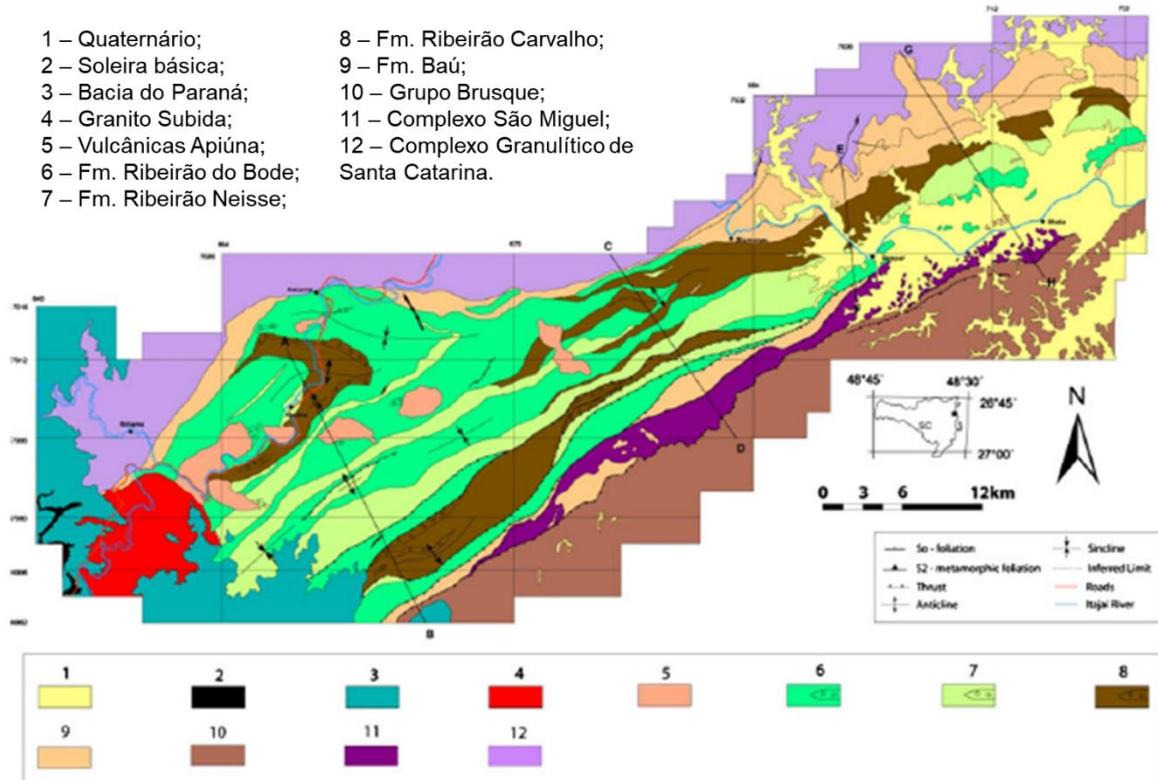
Fonte: Basei. *et al.* (2011).

Figura 19: Seções geológico-estruturais da BI. Mesmas cores da Figura 18.

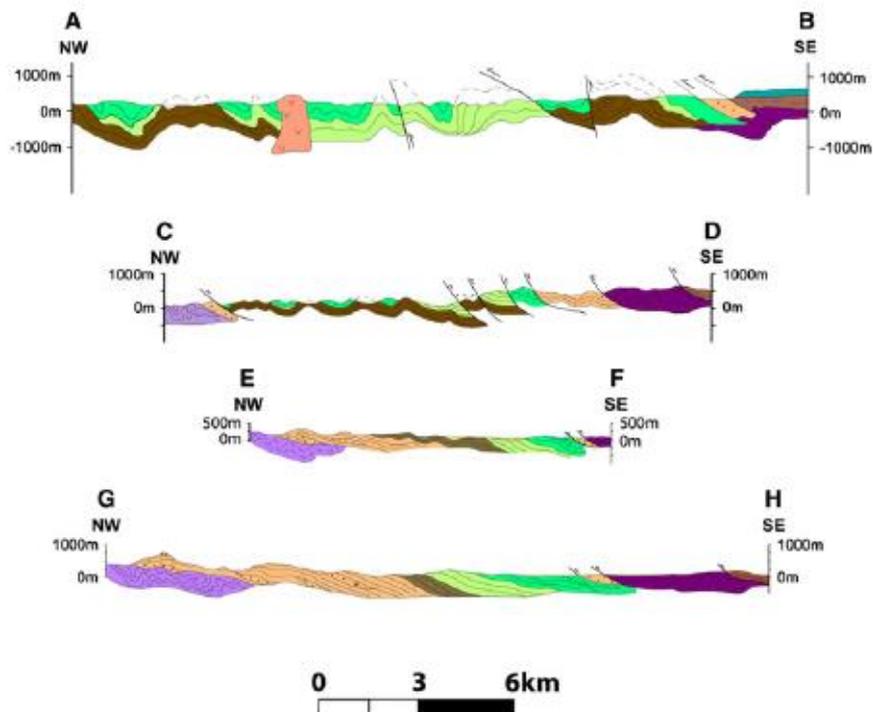
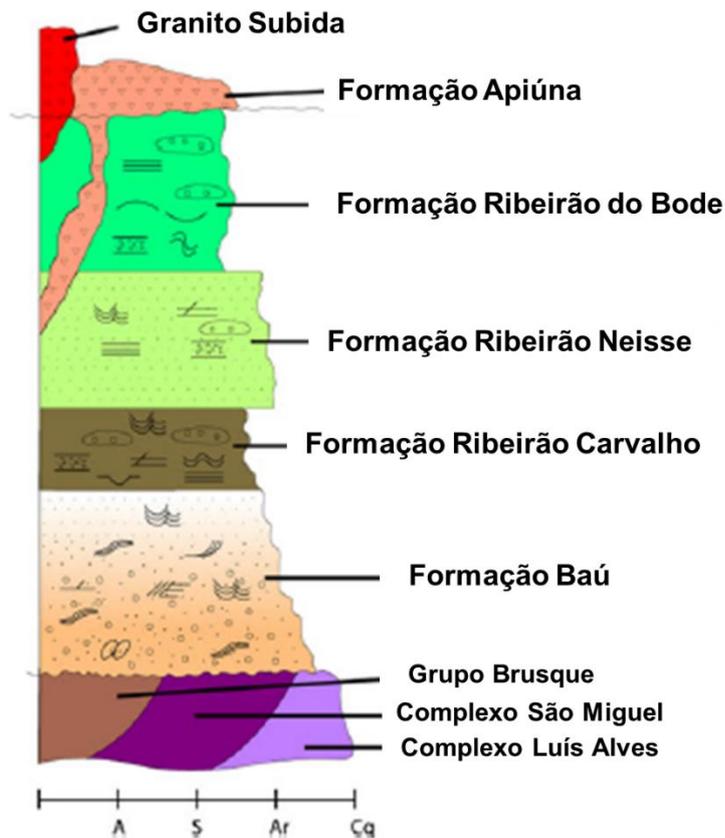
Fonte: Basei. *et al.* (2011).

Figura 20: Coluna estratigráfica da BI para o mapa e seções anteriores.



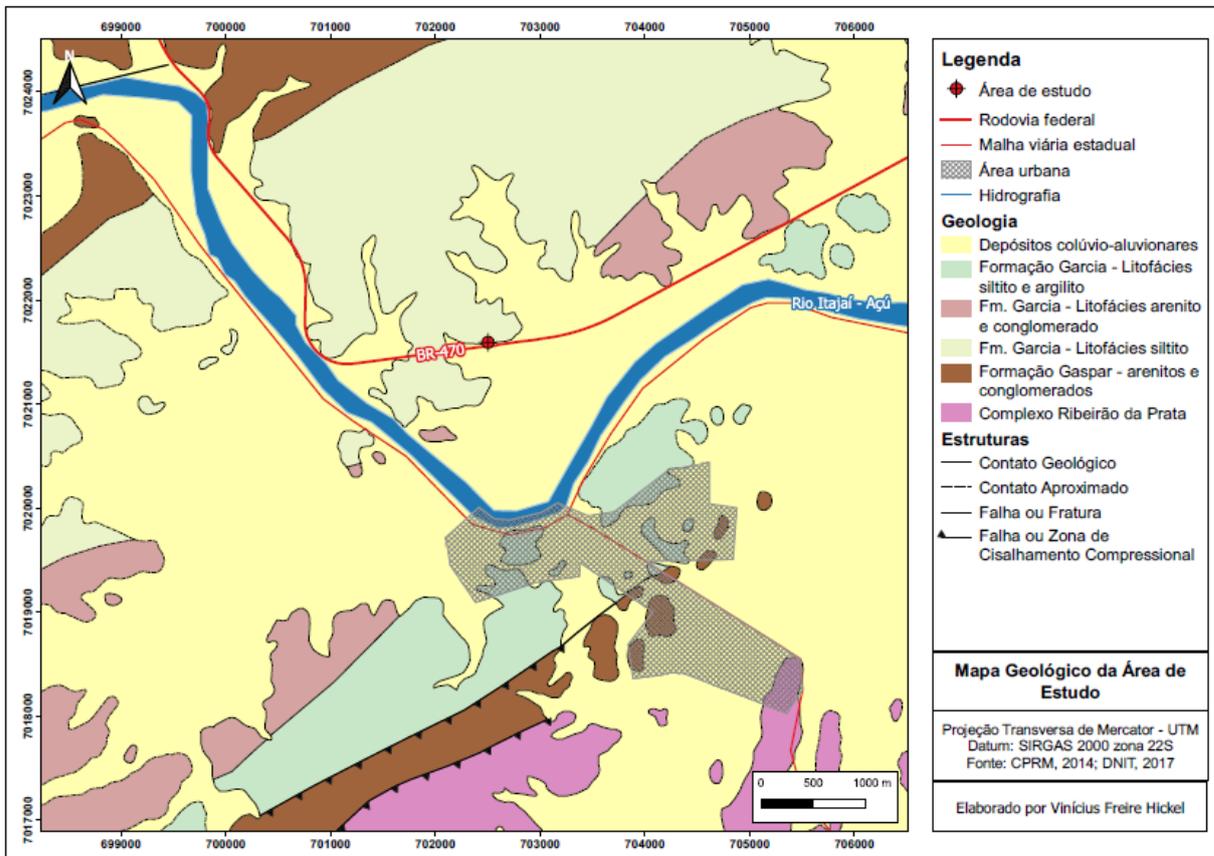
Fonte: Basei. *et al.* (2011).

Assim, conforme o mapa geológico de Santa Catarina (WILDNER *et al.*, 2014), o talude se localiza sobre siltitos e argilitos da Formação Garcia, a unidade de topo da BI (Figura 21), correspondente à Formação Ribeirão do Bode (Figura 20).

Na legenda do mapa original de Wildner *et al.* (2014), a Litofácies Silito da Formação Garcia é descrita como constituída por intercalações de lamitos, siltitos e arenitos finos a médios eventualmente grossos, estratificação plano-paralela a maciça, em camadas tabulares com granodecrescência ascendente.

A formação correspondente na estratigrafia conforme Basei *et al.* (2011), Fm. Ribeirão do Bode, representa a unidade sedimentar mais jovem da BI, com espessura estimada na ordem de 1500 m, composta por siltitos finamente laminados, alternados com camadas silte-argilosas que contêm níveis silte-arenosos; níveis de siltitos maciços ocorrem subordinadamente e intercalações de conglomerados polimíticos com clastos de vulcânicas ácidas ocorrem associadas a esta unidade. Nas seções geológicas da Figura 19, é possível observar que a borda SE da Fm. Ribeirão do Bode se encontra dobrada, e uma dessas dobras ocorre no talude estudado.

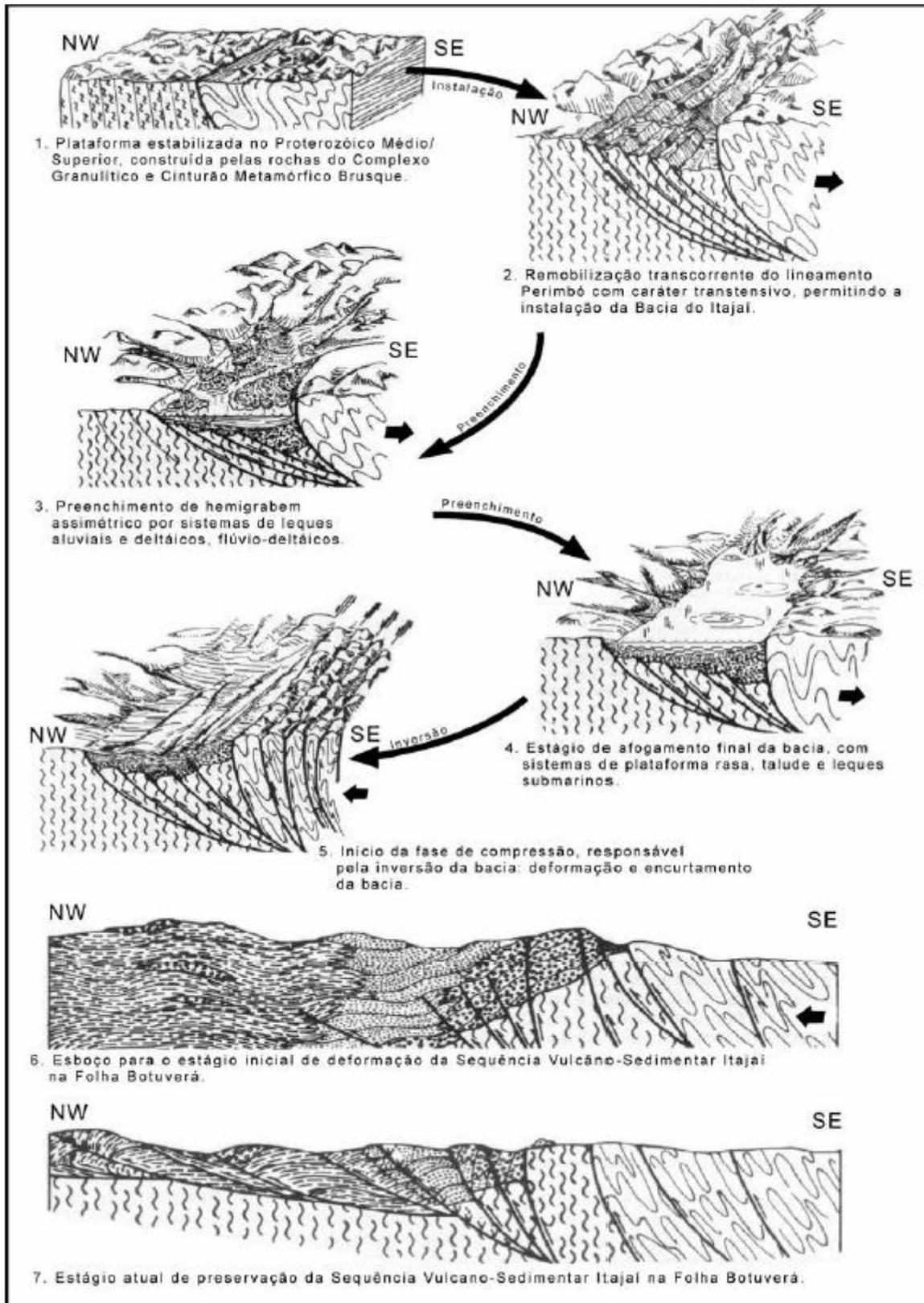
Figura 21: Mapa geológico da área no entorno do talude.



Fonte: elaborado pelo autor (2020), com base em Wildner *et al.* (2014).

Quanto à geologia estrutural, Basei *et al.* (2011) afirmam que o padrão de deformação observado na BI é caracterizado por duas fases principais de dobramento com orientações axiais distintas. Para os mesmos autores, a superfície de acamamento S_0 é a principal superfície em toda a bacia. Para Schroeder (2006), há dois eventos principais de deformação na bacia, o primeiro corresponde a uma atividade transpressiva, com dobras de vergência para NW e juntas de extensão paralelas ao eixo de tensão; o segundo evento de deformação, por sua vez, se caracteriza pela geração de falhas de direção NW, que cortam toda a bacia e se prolongam por dezenas de quilômetros, assim como pela reativação de falhas preexistentes. De acordo com Krebs *et al.* (1990), a evolução da BI é interpretada em um modelo no qual sua instalação se deu devido a esforços transtensivos, seguidos pelo preenchimento sedimentar e pelo fechamento da bacia a partir da inversão do regime tectônico que a gerou, por atividade transpressiva, conforme a Figura 22. De acordo com Basei *et al.* (2011), por outro lado, a BI representa uma bacia de tipo *foreland* (antepaís).

Figura 22: Desenho esquemático da evolução da BI segundo Krebs *et al.* (1990).



Fonte: Schroeder (2006).

3 METODOLOGIA

A seguir, são apresentados os materiais e métodos empregados em cada etapa do desenvolvimento deste estudo, das avaliações pré-campo, aos levantamentos em campo até o processamento final de dados e obtenção dos resultados.

Os trabalhos de campo foram realizados no dia 13 de junho de 2019, com a presença do orientador e do coorientador. O trabalho de escritório foi realizado no Laboratório de Geotecnia Aplicada (LGA) da Universidade Federal de Santa Catarina.

3.1 ANÁLISE DE IMAGENS DE SATÉLITE

Nesta etapa, a série histórica de imagens de satélite da plataforma Google Earth foi consultada, com vistas a obter informações temporais a respeito da construção e ruptura do talude.

3.2 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-ESTRUTURAL

Foi realizada com emprego de trena, bússola de geólogo do tipo Brunton, lupa mineralógica, martelo de geólogo e câmera fotográfica. Foi feita a descrição da rocha e o seu grau de alteração, assim como a definição dos tipos de discontinuidades presentes: acamamento sedimentar, juntas, falhas. Uma amostra da rocha da qual o talude é formado foi coletada, uma lâmina foi confeccionada e analisada, mas com vistas a caracterizá-la e elucidar os fatores em microescala que podem contribuir para seu comportamento mecânico. Mesma coisa com a geologia estrutural, foi executado um levantamento pontual, de interesse e propósitos geomecânicos, sem vistas a elucidar fatores evolutivos das rochas em estudo.

3.3 LEVANTAMENTO DE DESCONTINUIDADES

Quanto à obtenção dos parâmetros das discontinuidades (orientação, espaçamento, rugosidade, grau de alteração, persistência, preenchimento e umidade), foi utilizado o método de *scanline* (ISRM, 1978), no qual uma trena é disposta ao longo do talude e a distância de cada discontinuidade interceptada é marcada e identificada, juntamente com uma descrição de acordo com os parâmetros acima mencionados, em uma planilha padrão (Figura 23).

O método de obtenção de dados deve ser pensado de forma a atender uma determinada metodologia de análise, desta forma, o levantamento *scanline* se mostra como uma maneira adequada para técnicas mais difundidas de análise (no caso, RMR e SMR). Os dados a serem utilizados na

classificação SSPC foram coletados em uma planilha própria para este propósito (Figura 24). Também foram utilizados gabaritos de referência para parâmetros como rugosidade de acordo com o padrão ISRM (Figura 3), rugosidade em escala grande (Figura 10) e pequena (Figura 11), para a classificação SSPC.

Além disso, para subsidiar as análises cinemáticas, foram executados *tilt-tests* com amostras coletadas em campo, de forma a se obter uma estimativa inicial de ângulo de atrito. Uma amostra com a descontinuidade principal do talude foi retirada e separada na descontinuidade, de forma a ser composta por dois blocos. Foram executados três testes nessa amostra e a média foi adotada.

Uma ressalva importante quanto aos dados de orientação das descontinuidades diz respeito ao baixo número de medidas estruturais tomadas, devido à impossibilidade da execução de uma segunda campanha de levantamento em campo. Na campanha realizada, o objetivo principal foi de reconhecimento e caracterização geomecânica do maciço (com foco em parâmetros como espaçamento, preenchimento, etc.); as famílias foram definidas, as *scanlines* foram efetuadas e medições de atitude de descontinuidade foram tomadas em locais mais representativos. O plano inicial de campanhas envolvia um aerolevanteamento por VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado), para obtenção de topografia e de um modelo digital de afloramento, o que iria possibilitar medidas estruturais mais numerosas. Apesar desses problemas, os resultados deste estudo não devem ser comprometidos, visto que, como afirmam Hack, Price & Rengers (2002), a seleção de descontinuidades representativas para cada família, sua medição e caracterização em detalhe fornece resultados tão bons quanto ou melhores que os resultados advindos de um grande número de medições de descontinuidades para análise estatística.

Figura 23: Planilha padrão para levantamento de descontinuidades em campo.

Projeto: _____ Registrado por: _____ LEVANTAMENTO DE DESCONTINUIDADES - Método Scanline Planilha ____ de ____ Data: _____														
Início do segmento (Estaca)	Final do segmento (Estaca)	Cota início do segmento (m)	Direção (o)	Inclinação (o)	Observações:									
					<input type="checkbox"/> Direção do strike e magnitude de mergulho <input type="checkbox"/> Direção do mergulho (0 - 360°) e mergulho (0 - 90°)									
Número	Distância (m)	Tipo Litológico	Dir. do Mergulho (o)	Mergulho (o)	P	T	R	U	RP	A	O	E	C	Notas
Resistência (Tabela na p. 335) P1 - <1m P2 - 1-3m P3 - 3-10m P4 - 10-20m P5 - >20m														
Umidade (Tabela no meio da p. 358) U1 - Seca; água não detectada U2 - Fluxo pequeno de água U3 - Fluxo médio; especificar descontinuidade com fluxo contínuo * U4 - Fluxo maior; especificar descontinuidade com fluxo intenso * U5 - Fluxo excepcional; especificar fonte do fluxo * estimar em "litros/minuto/10m" de comprimento do túnel.														
Resistência das paredes da descontinuidade (Tabela na p. 348) RP0 - Extremamente mole (escavável com a unha) RP1 - Muito mole (ajuda com o martelo; escavável com canivete) RP2 - Mole (pequeno atumandamento com martelo; escavável com dificuldade usando canivete) RP3 - Média resistência (não escavável com canivete; requer uma martelada para quebrar) RP4 - Resistente (requer mais de uma martelada para quebrar) RP5 - Alta resistência (requer muitas marteladas para quebrar) RP6 - Extrema resistência (somente lascas são obtidas com marteladas)														
Abertura (Tabela na p. 352) O1 - <0,1mm (totalmente selada) O2 - 0,1 - 0,25mm (fechada) O3 - 0,25 - 0,5mm (parcialmente aberta) O4 - 0,5 - 2,5mm (aberta) O5 - 2,5 - 10mm (moderadamente aberta) O6 - >10mm (muito aberta) O7 - 1 - 10cm (muito larga) O8 - 10 - 100cm (extremamente larga) O9 - >1m (cauema)														
Espessura do preenchimento (Tabela na p. 352) E1 - <0,1mm (premiu) E2 - 0,1 - 0,25mm (muito fino) E3 - 0,25 - 0,5mm (moderadamente fino) E4 - 0,5 - 2,5mm (pouco espesso) E5 - 2,5 - 10mm (levemente espesso) E6 - >10mm (espesso) E7 - 1 - 10cm (moderadamente espesso) E8 - 10 - 100cm (muito espesso) E9 - >1m (extremamente espesso)														
Consistência do preenchimento (Tabela na p. 355) C0 - Extremamente mole (escavável com a unha) C1 - Muito mole (perfurável com o martelo; escavável com canivete) C2 - Mole (pequeno atumandamento com martelo; escavável com canivete com dificuldade) C3 - Média resistência (riscável com canivete; quebra com uma martelada) C4 - Alta resistência (requer mais de uma martelada para quebrar) C5 - Muito resistente (requer muitas marteladas para quebrar) C6 - Extrema resistência (somente lascas são obtidas com marteladas)														
Terminações T0 - Nenhuma terminação visível T1 - Uma terminação visível T2 - Ambas terminações visíveis														
Rigoridade (Tabela na p. 342 e Figuras 17 e 19) R1 - Rugosa, com degraus R2 - Lisa, com degraus R3 - Polida, com degraus R4 - Rugosa, ondulada R5 - Lisa, ondulada R6 - Polida, ondulada R7 - Rugosa, planar R8 - Lisa, planar R9 - Polida, planar														

Fonte: Modificado de ISRM (1978).

Figura 24: Planilha padrão para coleta de dados SSPC.

ITC/TU ENGINEERING GEOLOGY			exposure characterization			SSPC - SYSTEM		
LOGGED BY:		DATE:	TIME:		hr	exposure no:		
WEATHER CONDITIONS			LOCATION		map no:			
Sun:	cloudy/fair/bright		Map coordinates:		northing:			
Rain:	dry/drizzle/slight/heavy				easting:			
METHOD OF EXCAVATION (ME)			DIMENSIONS/ACCESSIBILITY					
(tick)			Size total exposure: (m) l:		h:	d:		
natural/hand-made		1.00						
pneumatic hammer excavation		0.76						
pre-splitting/smooth wall blasting		0.99	mapped on this form: (m) l:		h:	d:		
conventional blasting with result:								
good		0.77						
open discontinuities		0.75						
dislodged blocks		0.72				Accessibility: poor/fair/good		
fractured intact rock		0.67						
crushed intact rock		0.62						
FORMATION NAME:								
DESCRIPTION (BS 5930: 1981)								
colour	grain size	structure & texture		weathering		NAME		
INTACT ROCK STRENGTH (IRS) (tick)								
< 1.25 MPa	Crumbles in hand		sample number(s):			WEATHERING (WE)		
1.25 - 5 MPa	Thin slabs break easily in hand					(tick)		
5 - 12.5 MPa	Thin slabs broken by heavy hand pressure					unweathered	1.00	
12.5 - 50 MPa	Lumps broken by light hammer blows					slightly	0.95	
50 - 100 MPa	Lumps broken by heavy hammer blows					moderately	0.90	
100 - 200 MPa	Lumps only chip by heavy hammer blows (Dull ringing sound)					highly	0.62	
> 200 MPa	Rocks ring on hammer blows. Sparks fly.					completely	0.35	
DISCONTINUITIES B=bedding C=Cleavage J=joint								
Dip direction	(degrees)		..1	..2	..3	..4	..5	EXISTING SLOPE?
Dip	(degrees)							dip-direction/dip
Spacing (DS)	(m)							/
persistence	along strike	(m)						height: m
	along dip	(m)						Stability (tick)
CONDITION OF DISCONTINUITIES								
Roughness large scale (Rl)	wavy	:1.00						stable
	slightly wavy	:0.95						small problems in near future
	curved	:0.85						large problems in near future
	slightly curved	:0.80						small problems
Roughness small scale (Rs) (on an area of 20 x 20 cm ²)	straight	:0.75						large problems
	rough stepped/irregular	:0.95						notes:
	smooth stepped	:0.90						1) For infill 'gouge > irregularities' and 'flowing material' small scale roughness = 0.55
	polished stepped	:0.85						2) If roughness is anisotropic (e.g. ripple marks, striation, etc.) roughness should be assessed perpendicular and parallel to the roughness and directions noted on this form.
	rough undulating	:0.80						3) Non-fitting of discontinuities should be marked in roughness columns.
	smooth undulating	:0.75						
Infill material (Im)	polished undulating	:0.70						
	rough planar	:0.65						
	smooth planar	:0.60						
	polished planar	:0.55						
Karst (Ka)	cemented/cemented infill	:1.07						
	no infill - surface staining	:1.00						
	non softening & sheared material, e.g. free of clay, talc, etc.	coarse :0.95 medium :0.90 fine :0.85						
	soft sheared material, e.g. clay, talc, etc.	coarse :0.75 medium :0.65 fine :0.55						
SUSCEPTIBILITY TO WEATHERING (SW)	gouge < irregularities	:0.42						
	gouge > irregularities	:0.17						
	flowing material	:0.05						
degree of weathering:	date excavation:	remarks:	remarks:					

Fonte: Hack (1998).

3.4 ANÁLISE CINEMÁTICA

Para a realização das análises cinemáticas, foi necessário plotar em estereogramas as medidas estruturais obtidas em campo. Para tal fim, foi utilizado o *software* Stereonet 10.1 (CARDOZO; ALLMENDINGER, 2013). Para as análises propriamente ditas, utilizou-se a metodologia apresentada por Lisle e Leyshon (2018), embutida no programa computacional supracitado.

3.5 CLASSIFICAÇÃO DO MACIÇO

A classificação do maciço foi realizada de acordo com três sistemas, por meio da utilização dos dados obtidos no levantamento de campo. A classificação geomecânica de Bieniawski (1974), denominada RMR (*Rock Mass rating*), foi calculada e serviu de *input* para o segundo sistema de classificação, *Slope Mass Rating*, introduzido por Romana (1985). A obtenção dos parâmetros de correção do SMR foi realizado por meio do aplicativo computacional desenvolvido por Riquelme *et al.* (2014), *SMRTool beta*. O terceiro método de classificação não se relaciona diretamente com os anteriores: o *Slope Stability Probability Classification* (SSPC), desenvolvido por Hack (1998), foi calculado, com base em uma planilha própria para obtenção de parâmetros do talude e das descontinuidades.

3.6 INTEGRAÇÃO DE DADOS

Após a obtenção dos resultados de cada etapa, a integração dos dados foi feita. Os resultados quantitativos em mesmas unidades de medida, relativos aos mesmos conceitos, foram comparados diretamente e os resultados qualitativos foram comparados com base em suas similaridades ou diferenças.

4 RESULTADOS

A seguir, os resultados de cada etapa do estudo são apresentados, das investigações preliminares aos trabalhos de campo, às análises de estabilidade e à classificação do maciço.

4.1 ANÁLISE DE IMAGENS DE SATÉLITE

Não houve a possibilidade de obter dados construtivos do talude, portanto, a série histórica de imagens de satélite da plataforma Google Earth foi consultada, de forma a possivelmente obter informações a respeito das datas de ruptura e de construção do talude. A primeira imagem da série é datada de janeiro de 2003 (Figura 25), o talude em estudo ainda não havia sido construído, mas havia um talude de corte anterior, com cobertura vegetal, feito quando a rodovia foi criada (por volta da década de 1980). A imagem mais recente anterior à construção do talude estudado é datada de março de 2015 (Figura 26), as obras de duplicação da rodovia já haviam se iniciado, mas o talude ainda não havia sido remodelado. No próximo registro, de maio de 2016, o talude já estava remodelado e rompido (Figura 27). Ou seja, nesse intervalo de 14 meses, o talude foi construído e sofreu a ruptura maior que se observa hoje, não ficou muito tempo imperturbado.

Figura 25: Imagem de satélite mais antiga da área no Google Earth – janeiro de 2003.



Fonte: Google Earth (acesso em 22/04/2020).

Figura 26: Imagem de satélite mais recente anterior à construção do talude estudado – março de 2015.



Fonte: Google Earth (acesso em 22/04/2020).

Figura 27: Primeiro registro de imagem de satélite após a construção do talude – maio de 2016.



Fonte: Google Earth (acesso em 22/04/2020).

4.2 CARACTERIZAÇÃO GERAL DO TALUDE

Neste item, o talude é descrito em termos de orientação e dimensões, suas características litológicas, suas condições de drenagem, suas características estruturais e então, suas rupturas.

4.2.1 Orientação e dimensões

O talude estudado se localiza em um trecho no qual a rodovia BR-470 tem orientação E-W. A oeste, há outro talude da mesma litologia, menos alterado, no qual se deu a coleta de amostras para análise petrográfica (Figura 28).

Figura 28: Localização do talude estudado (vermelho) e do talude onde foram coletadas amostras (amarelo).



Fonte: Google Earth (acesso em 22/04/2020).

Trata-se de um talude de corte, escavado mecanicamente, com três bancadas de cerca de 8 m de altura (Figura 29). Seu comprimento é de cerca de 150 m e sua altura total é de cerca de 26 m. Sua orientação é de 40-175, ou seja, tem 40° de mergulho na direção 175 azimute.

Figura 29: Visão geral do talude.



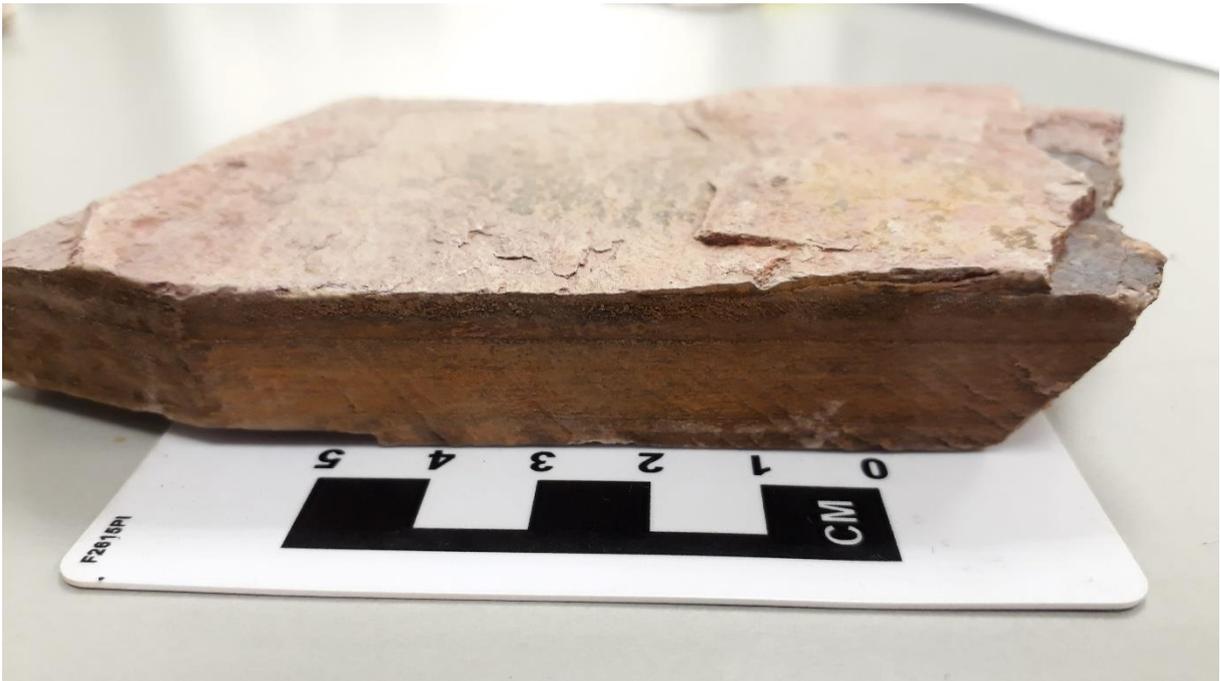
Fonte: Elaborada pelo autor (2019).

4.2.2 Caracterização litológica

O talude é constituído por rocha pelítica finamente laminada de cor ocre a castanho, com alternância milimétrica de bandas de tamanho de grão silte e argila, com predomínio de silte. Nas bandas argilosas, mais finas, assim como nas fraturas, há presença de matéria orgânica.

A amostra coletada no talude vizinho, constituído por um maciço de mesma litologia, porém menos alterado, foi utilizada para a confecção de uma seção delgada para análise microscópica (Figura 30 e Figura 31). Na análise em lupa de mesa, não foi possível identificar minerais em específico, devido à textura fina da rocha. Predominam argilominerais. No entanto, foi possível individualizar melhor as porções sílticas das porções argilosas. Na Figura 32, a seção delgada em luz natural é apresentada e na Figura 33, a mesma seção vista sobre nicóis cruzados. Na Figura 33, as porções escuras indicam predomínio de grãos de tamanho argila, enquanto as porções mais claras indicam predomínio de grãos tamanho silte. Geotecnicamente, são essas porções argilosas que representam planos de maior fraqueza (pela possibilidade de arranjo paralelo das folhas dos argilominerais, de hábito lamelar, micáceo) e suscetibilidade à alteração (pela maior retenção de umidade e quando da presença de argilas expansivas).

Figura 30: Amostra coletada no talude vizinho.



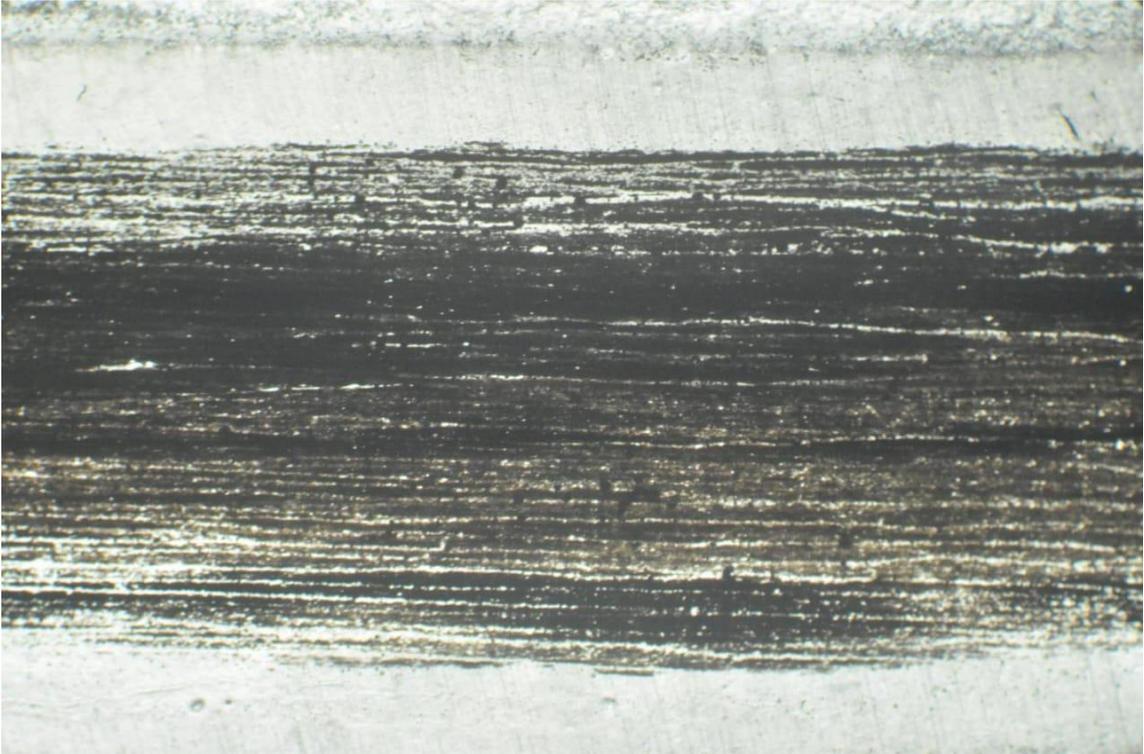
Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Figura 31: Seção delgada produzida a partir da amostra coletada no talude.



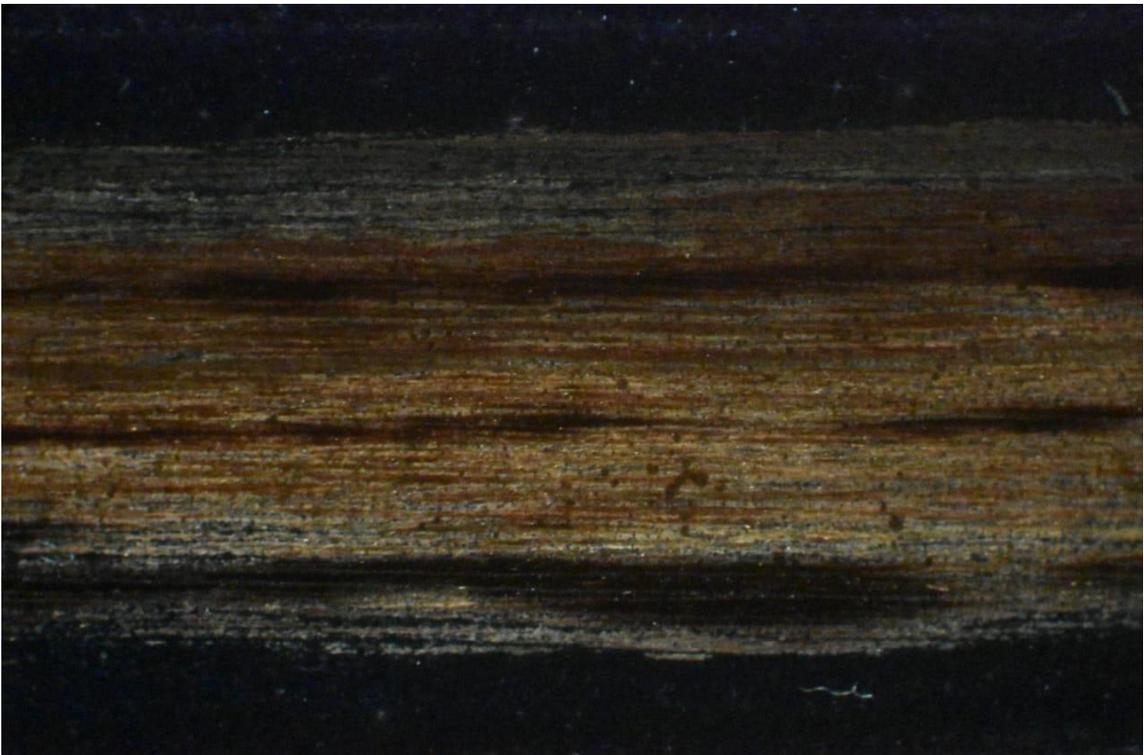
Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Figura 32: Seção delgada ampliada em luz natural.



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Figura 33: Seção delgada em nicóis cruzados.



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

4.2.3 Condições de drenagem

Na vertente leste do talude, há uma drenagem que recebe a água que cai sobre o maciço. Ela seria canalizada por um sistema em concreto, danificado pela ruptura. A drenagem em concreto não apresenta dissipador algum de energia, o que causa erosão onde deixa de ser canalizada (na extremidade do talude). O sistema de drenagem danificado (Figura 34 e Figura 35) contribui para a manutenção da umidade no talude. Outro fator observado que mantém condições hidráulicas desfavoráveis no talude é a não incidência de luz solar durante todo o período do dia, devido à sua orientação.

Figura 34: Sistema de drenagem danificado pelo rompimento do talude – vista para leste.



Fonte: Elaborada pelo autor (2019).

Figura 35: Sistema de drenagem danificado pelo rompimento do talude – vista para oeste.



Fonte: Elaborada pelo autor (2019).

Na vertente oeste, há presença de cerca de 1,8m de horizonte A+B de solo, o que não se observa do outro lado. O grau de alteração na rocha subjacente varia conforme afasta-se deste indicador de topografia original. O saprólito e depois a rocha ficam mais são (mesmo que no talude como um todo a rocha se mostra bastante alterada, branda e abrandada).

4.2.4 Caracterização estrutural

O acamamento da rocha sedimentar se apresenta dobrado tanto em escala métrica quanto decimétrica. O maciço se localiza no flanco de uma dobra de maior dimensão (Figura 36), que bascula os estratos originalmente horizontais, os coloca a mergulhar de forma desfavorável à segurança do talude. É possível observar também dobras métricas e menores (Figura 37) no talude e nas proximidades, essas, no entanto, não mudam a direção de mergulho das camadas, apenas horizontalizam localmente o acamamento. São dobras subordinadas, portanto.

A princípio, as dobras em escala de afloramento não representam desfavorabilidade em relação à estabilidade geral do talude, ao menos não em termos geométricos. Representam obstáculos à movimentação de blocos ao longo das superfícies de acamamento. No entanto, há uma tendência de fraturamento nos eixos de dobras. Isto pode contribuir negativamente à estabilidade, na medida em que aumenta a taxa de intemperismo e diminui o tamanho de blocos.

Figura 36: Dobra decamétrica de S0 no talude estudado (eixo 07-220).



Fonte: Elaborada pelo autor (2019).

Figura 37: Dobra decimétrica de S0 no talude estudado (charneira 07-215). Interpretação à direita.



Fonte: Elaborada pelo autor (2019).

O maciço não é apenas dobrado, é também intensamente fraturado. Um total de quatro famílias foram individualizadas. A mais importante correspondente ao acamamento da rocha sedimentar, que constitui uma descontinuidade tanto física quanto composicional (devido à alternância de bandas siltosas

e argilosas), denominada nesse trabalho de S0. As outras três famílias (denominadas J1, J2a e J2b) correspondem a juntas e serão tratadas em mais detalhe no item 4.3: “Dados das discontinuidades”. Há também zonas de falha no maciço (como é possível observar na Figura 36), mas, em face da abundância de discontinuidades das quatro famílias, não exercem um papel de protagonismo na estabilidade do talude.

4.2.5 Caracterização das rupturas

Três tipos de ruptura foram identificados no maciço: rupturas planares, em cunha e circulares. A maior, localizada aproximadamente no centro do talude, é do tipo circular, de comportamento granular (Figura 29). As outras rupturas, de menor porte, têm uma componente estrutural mais evidente. Há rupturas planares ao longo das discontinuidades S0 (Figura 38) e rupturas em cunha na interseção entre S0 e J1, liberadas na vertical por J2a/b (Figura 39 e Figura 40).

Figura 38: Ruptura planar maior ou cunha encoberta (direita) e ruptura menores em cunha (esquerda).



Fonte: Elaborada pelo autor (2019).

Figura 39: Detalhe de uma pequena ruptura em cunha. Caderneta de escala.



Fonte: Elaborada pelo autor (2019).

Figura 40: Detalhe de pequenas rupturas em cunha. Caderneta de escala.



Fonte: Elaborada pelo autor (2019).

A ruptura principal ocorre com uma estruturação oblíqua à face do talude. Hipóteses iniciais a respeito do seu histórico e causas foram levantadas: rupturas menores em rocha, em cunha/planares, na base do talude teriam desestabilizado o talude, que viria a romper também na parte superior, composta por um saprólito, que desenvolveu uma grande ruptura quase circular; 1) esse deslizamento maior coincidiria com um dos eixos de dobra subordinada (impossível de se verificar devido à cobertura por detritos), fragilizado por faturamento mais intenso; 2) essa ruptura estaria em parte condicionada pela geometria do talude (ocorreu em sua parte mais alta) e em parte devido à estruturação do maciço.

O deslizamento principal deveria ser perpendicular ao corte do talude, se analisado apenas à luz de mecânica dos solos. Portanto, há motivo para admitir que a estruturação da rocha condicionou um deslizamento oblíquo em relação à direção do talude, mesmo que com aspecto circular.

4.3 DADOS DAS DESCONTINUIDADES

Um total de quatro famílias de fraturas de interesse foram individualizadas: S0, J1, J2a e J2b (denominadas assim pois são duas famílias muito similares, que exercem o mesmo papel). A grosso modo, a intersecção entre as famílias S0 e J1 gera cunhas que são liberadas na porção superior pelas juntas das famílias J2a e b. Quanto aos dados aqui apresentados, é importante atentar para a ressalva expressa no item 3.3, que diz respeito ao número de medidas estruturais tomadas.

4.3.1 Família S0

A família S0, como mencionado anteriormente, corresponde à superfície de acamamento sedimentar e é caracterizada pelo condicionamento de rupturas planares/cunha. Sua orientação foi obtida em pontos representativos do talude e estão listadas no Quadro 11. Estes dados se encontram representados em estereograma na Figura 41. A orientação dessas descontinuidades não representa apenas os planos de fraqueza do acamamento sedimentar, representam também a orientação do flanco da dobra vista na Figura 36.

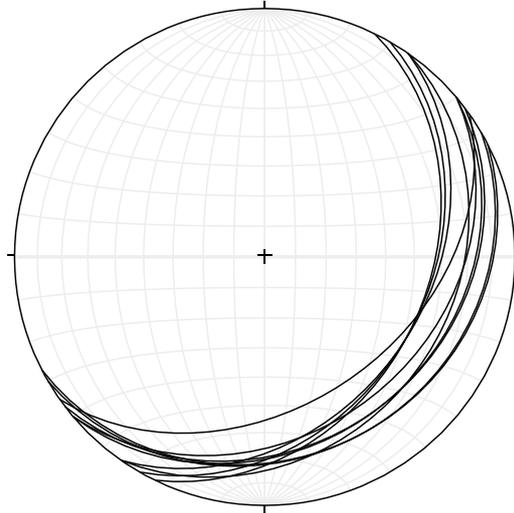
Quadro 11: Medidas representativas da família de descontinuidades S0.

Medida S0	Ângulo de mergulho (°)	Azimute do mergulho (°)
1	20	153
2	30	140
3	25	125
4	40	145
5	20	150
6	25	140
7	35	125
8	35	116
9	25	143

Medida S0	Ângulo de mergulho (°)	Azimute do mergulho (°)
10	35	120

Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

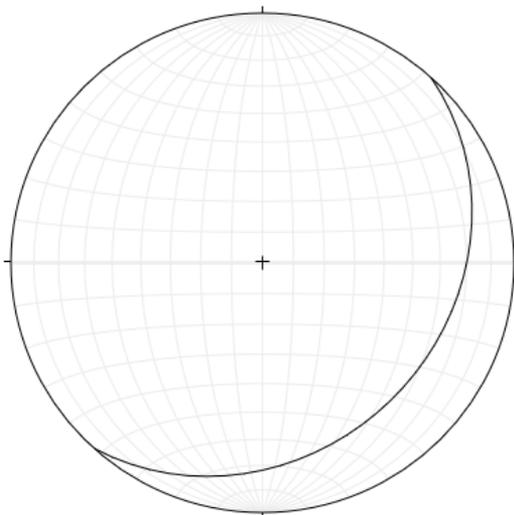
Figura 41: Planos S0 plotados em estereograma – Rede equiárea – hemisfério inferior.



Fonte: Elaborada pelo autor (2019).

Em termos de média, a S0 tem orientação 26-132, conforme a Figura 42.

Figura 42: Orientação média da família S0 em estereograma– Rede equiárea – hemisfério inferior.



Fonte: Elaborada pelo autor (2019).

Quanto aos parâmetros geomecânicos, duas *scanlines* foram levantadas, ortogonais aos planos, de modo a se obter o espaçamento corretamente. A seguir, as informações levantadas:

- Persistência: **muito persistente (>20 m);**

- Espaçamento: **0,326 m**;
- Abertura: **totalmente selada (<0,1 mm)**;
- Preenchimento: **extremamente mole (escavável com a unha)**;
- Rugosidade: **lisa, ondulada**;
- Alteração das paredes das descontinuidades: **decomposta**;
- Umidade: **fluxo pequeno de água**.

4.3.2 Família J1

A família J1, composta por juntas que correspondem ao segundo plano das cunhas ou ao plano que libera lateralmente o deslizamento planar, foi medida em scanline próxima à base do talude (Figura 43), em sua margem esquerda. No Quadro 12, as medidas tomadas em pontos representativos da família no talude. Na Figura 44, estas informações representadas em estereograma.

Figura 43: Levantamento *scanline* da família J1.



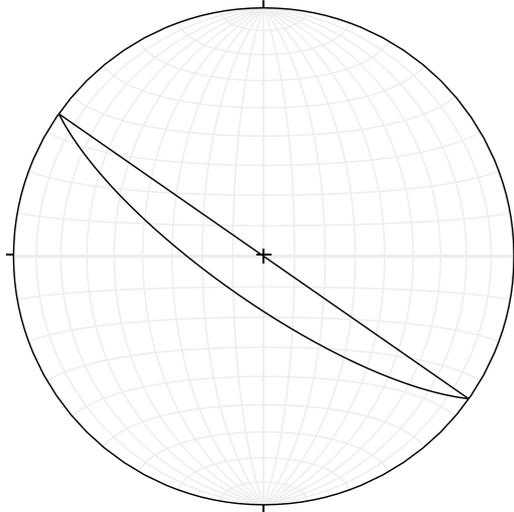
Fonte: Elaborada pelo autor (2019).

Quadro 12: Medidas representativas da família de descontinuidades J1.

Medida J1	Ângulo de mergulho (°)	Azimute do mergulho (°)
1	75	215
2	90	215

Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Figura 44: Planos J1 plotados em estereograma – Rede equiárea – hemisfério inferior.



Fonte: Elaborada pelo autor (2019).

Quanto aos parâmetros geomecânicos, as informações levantadas são apresentadas a seguir:

- Persistência: **<1 m;**
- Espaçamento: **0,046 m;**
- Abertura: **fechada (0,1 a 0,25 mm);**
- Preenchimento: **extremamente mole (escavável com a unha);**
- Rugosidade: **lisa, planar;**
- Alteração das paredes das descontinuidades: **decomposta;**
- Umidade: **fluxo pequeno de água.**

4.3.3 Famílias J2a e J2b

As famílias J2a e J2b, compostas por juntas, exercem a função de liberar a parte superior da cunha. Das quatro famílias presentes no maciço, são as que possuem maiores espaçamentos. Uma característica qualitativa que separa as famílias J2a e J2b das outras duas presentes no maciço é o material de preenchimento escuro nas descontinuidades. Foi levantada em *scanline* ortogonal, ao subir as bancadas (Figura 45). Optou-se por tratar as duas famílias em conjunto devido a sua homogeneidade em espaçamento e demais parâmetros, assim como por seu papel geotécnico.

Figura 45: Levantamento *scanline* das famílias J2a e J2b.



Fonte: Elaborada pelo autor (2019).

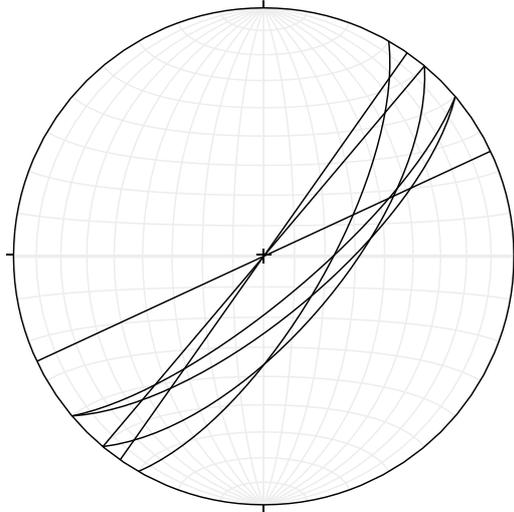
O grupo J2a ocorre com maior frequência. No Quadro 13, as medidas tomadas em pontos representativos da família no talude. E na Figura 46, as medidas plotadas em estereograma.

Quadro 13: Medidas representativas do grupo de descontinuidades J2a.

Família J2a	Ângulo de mergulho (°)	Azimute do mergulho (°)
1	70	140
2	70	120
3	65	130
4	90	130
5	75	140
6	90	125
7	90	155

Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Figura 46: Planos J2a plotados em estereograma – Rede equiárea – hemisfério inferior.



Fonte: Elaborada pelo autor (2019).

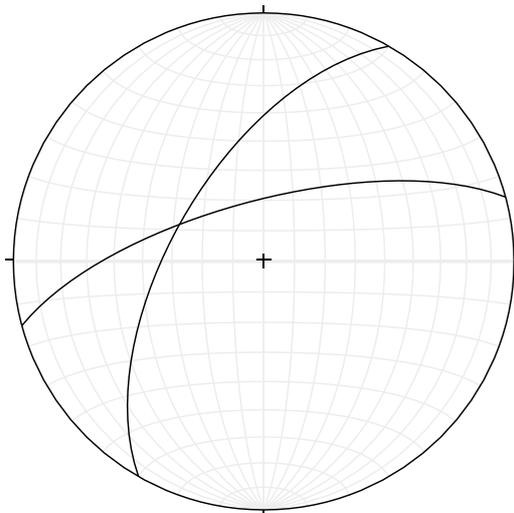
O grupo J2b, por sua vez, é menos frequente e seus planos entram no talude. No Quadro 14, as medidas tomadas em pontos representativos da família no talude. E na Figura 47, as medidas plotadas em estereograma.

Quadro 14: Medidas representativas do grupo de descontinuidades J2b.

Família J2b	Ângulo de mergulho (°)	Azimute do mergulho (°)
1	60	300
2	70	345

Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Figura 47: Planos J2b plotados em estereograma – Rede equiárea – hemisfério inferior.



Fonte: Elaborada pelo autor (2019).

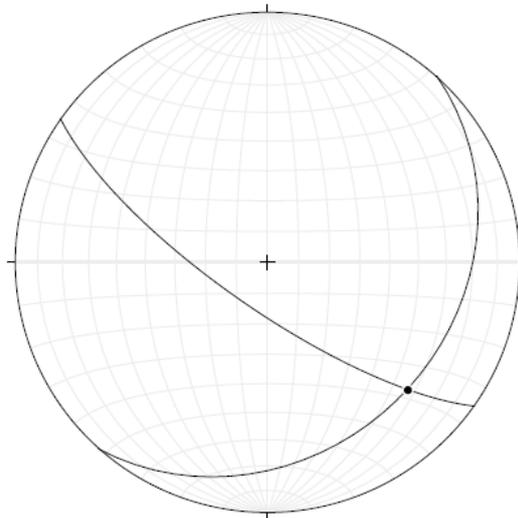
Quanto aos parâmetros geomecânicos, as informações levantadas valem para as duas famílias e são apresentados a seguir:

- Persistência: **de 1 a 3 m;**
- Espaçamento: **0,57 m;**
- Abertura: **aberta (1 a 5 mm);**
- Preenchimento: **muito mole (perfurável com martelo, escavável com canivete);**
- Rugosidade: **rugosa, com degraus;**
- Alteração das paredes das descontinuidades: **decomposta;**
- Umidade: **fluxo pequeno de água.**

4.3.4 Cunha S0/J1

A linha de intersecção entre as famílias S0 e J1 mergulha em direção ao talude com inclinação menor do que seu mergulho. A linha mais representativa desta interação tem um caimento de 26° para $132,5$ Az, conforme a Figura 48.

Figura 48: Linha de intersecção S0/J1 plotada em estereograma – Rede equiárea – hemisfério inferior.



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

4.4 ANÁLISE CINEMÁTICA

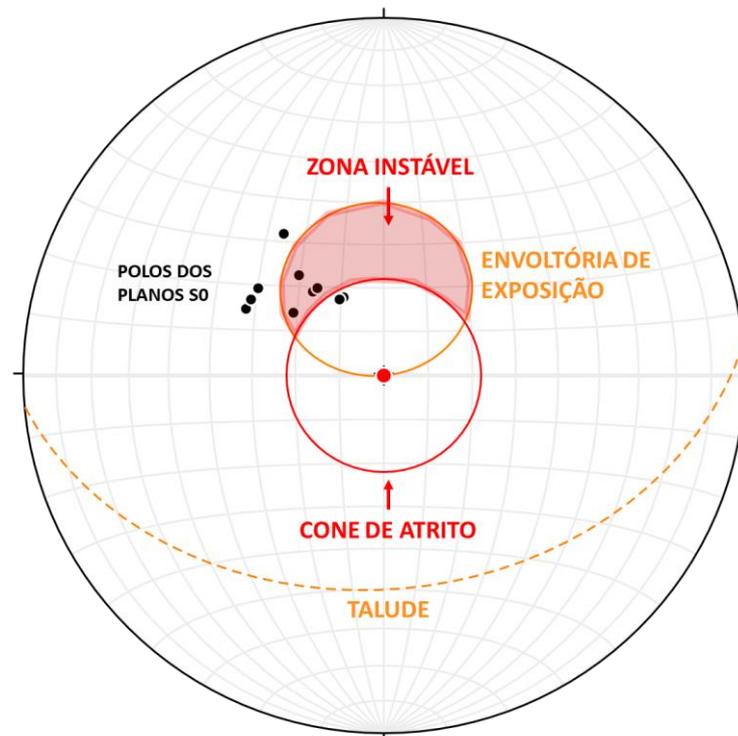
Para a execução da análise cinemática, foram executados três *tilt tests* em campo, para uma estimativa inicial de ângulo de atrito. Os resultados foram de 25°, 20° e 20°. Utilizou-se o valor de 22° no cone de atrito das análises em estereograma.

4.4.1 Análise de ruptura planar

As análises para ruptura planar foram executadas para os planos S0 (Figura 49) e para o plano médio S0 (Figura 50). Uma parte das discontinuidades medidas encontra-se instável conforme as relações geométricas entre seus planos e o talude. Quanto à discontinuidade correspondente ao plano de acamamento médio da rocha, a análise para ruptura planar indica que se encontra em orientação desfavorável em relação ao corte do talude, dentro da envoltória de exposição e fora do cone de atrito. Estes dados são corroborados pelos deslizamentos observados em campo.

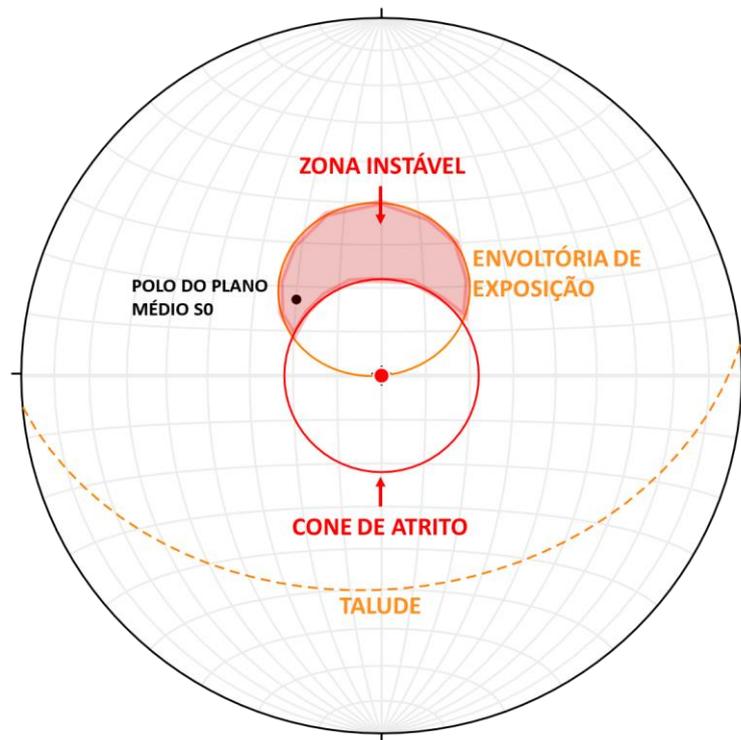
Da Figura 51 à Figura 53 é possível observar as análises para as demais discontinuidades, todas encontram-se estáveis quanto a rupturas planares.

Figura 49: Análise para ruptura planar com polos dos planos S0. Uma parte se encontra instável.



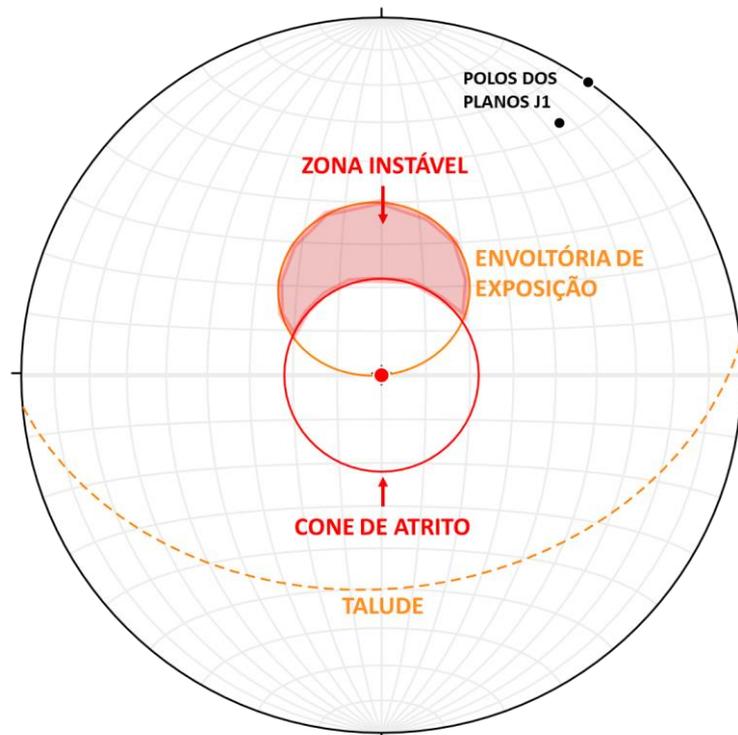
Fonte: Elaborada pelo autor (2019).

Figura 50: Análise cinemática para ruptura planar, com utilização do polo médio do acamamento.



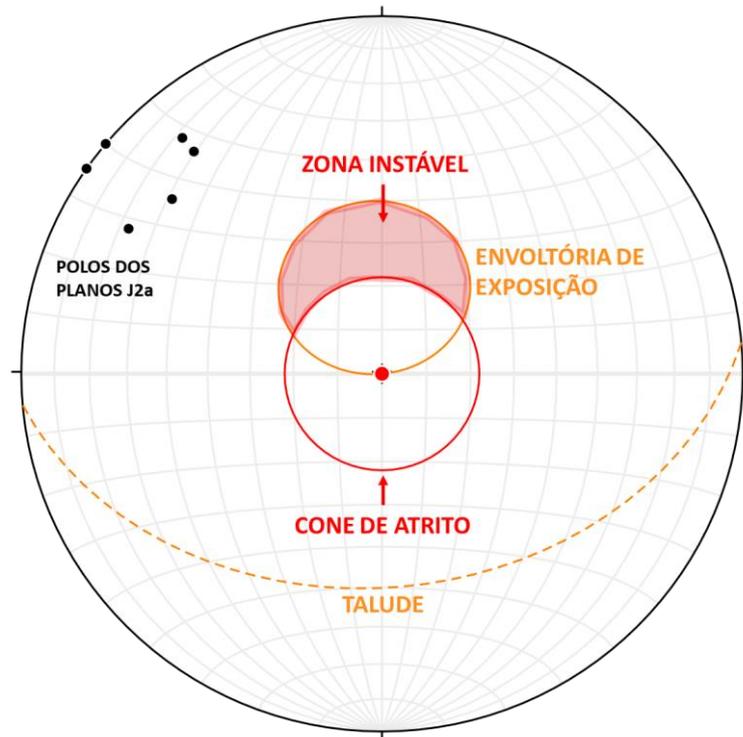
Fonte: Elaborada pelo autor (2019).

Figura 51: Análise para ruptura planar com polos dos planos J1. Encontram-se estáveis.



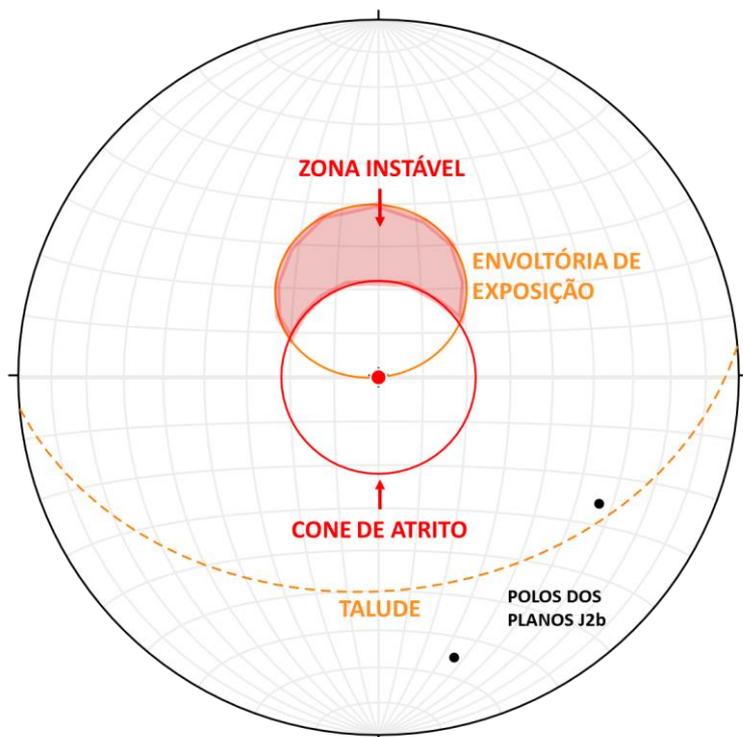
Fonte: Elaborada pelo autor (2019).

Figura 52: Análise para ruptura planar com os polos dos planos J2a. Encontram-se estáveis.



Fonte: Elaborada pelo autor (2019).

Figura 53: Análise para ruptura planar com os polos dos planos J2b. Encontram-se estáveis.

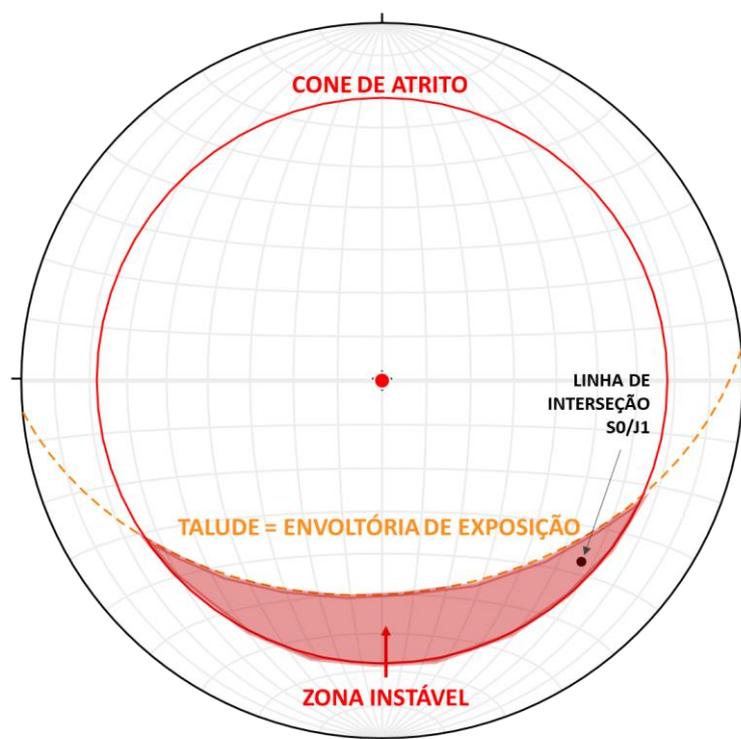


Fonte: Elaborada pelo autor (2019).

4.4.2 Análise de ruptura em cunha

A principal cunha presente no maciço é representada pela interseção entre a família correspondente ao plano de acamamento da rocha (S0) e a família J1. De acordo com a análise cinemática, esta linha encontra-se em orientação desfavorável em relação ao corte do talude, dentro da envoltória de exposição (Figura 54). Informações que corroboram o observado em campo.

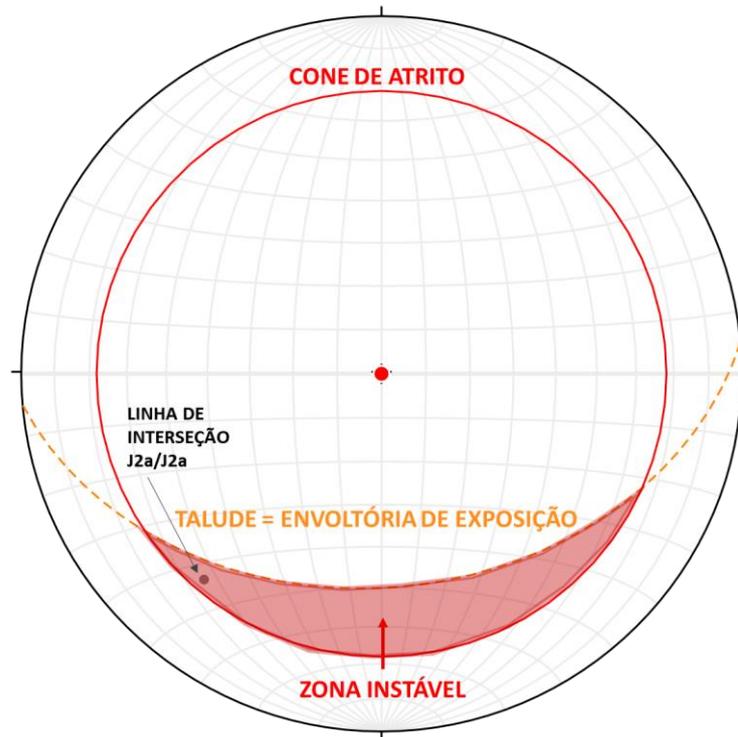
Figura 54: Análise cinemática para ruptura em cunha, interseção entre o acamamento (S0) e a família de fraturas J1.



Fonte: Elaborada pelo autor (2019).

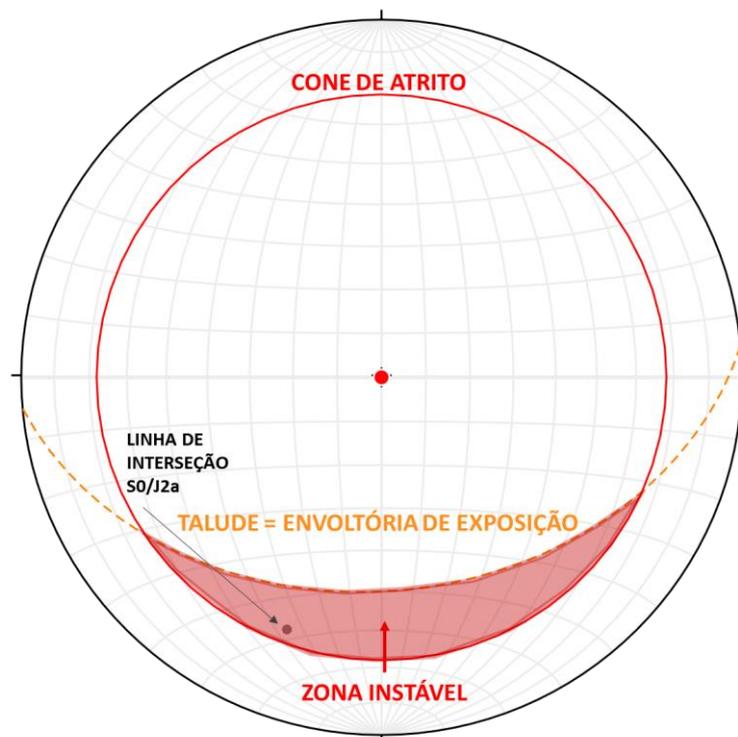
Além da cunha S0/J1, com escorregamentos grandes e pequenos observados, notou-se que dois planos da família J2a se intersectam em área de instabilidade (Figura 55); no entanto, provavelmente devido à baixa persistência da família, não foram observadas rupturas com esta configuração em campo. O mesmo ocorre para a intersecção entre um plano S0 e J2a (Figura 56), pelo mesmo possível motivo não se observa rupturas como esta em campo.

Figura 55: Análise para ruptura em cunha para dois planos J2a que se intersectam na área de instabilidade.



Fonte: Elaborada pelo autor (2019).

Figura 56: Análise para ruptura em cunha para intersecção entre plano S0 e J2a na área de instabilidade.



Fonte: Elaborada pelo autor (2019).

4.5 SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO

Nesta seção são apresentados os resultados das classificações nos sistemas RMR, SMR e SSPC.

4.5.1 Rock Mass Rating (RMR)

A aplicação da classificação geomecânica de Bieniawski resultou em três avaliações, de acordo com cada família de descontinuidades. Os parâmetros das descontinuidades que entram na classificação RMR já foram discutidos no item 4.3. Quanto aos parâmetros do maciço: a resistência da rocha intacta está entre 1 e 5 MPa; e o RQD é menor do que 25%.

A análise do maciço com base na família S0 resultou em um valor RMR de 25, pertencente à classe IV de maciços – rocha ruim (Quadro 15). A família J1 resultou em um valor de 30, pertencente à mesma classe de RMR (Quadro 16). Quanto à família J2, o valor resultante foi de 34, o que ainda resulta na classe IV (Quadro 17). Portanto, o maciço como um todo se classifica como um maciço de rocha ruim, classe quatro. Assim, a estimativa de coesão é de 0,1 a 0,2 MPa; o ângulo de atrito fica entre 15 e 25°; e o corte seguro do talude fica por volta dos 45°.

Essa avaliação, no entanto, não leva em consideração as orientações das descontinuidades, fator determinante quanto a estabilidade de maciços rochosos. Trata-se da classificação por RMR básico (RMR_B), sem a aplicação dos fatores de correção propostos por Bieniawski, visto que a classificação SMR foi aplicada com este propósito.

Quadro 15: Parâmetros e pesos para classificação RMR – família S0.

Parâmetros (família S0)	Valores Ponderais
Resistência do material rochoso intacto	1
RQD	3
Espaçamento	5
Persistência	0
Abertura	5
Rugosidade	1
Preenchimento	2
Grau de alteração	1
Infiltração de água	7
RMR	25
Classe RMR	IV

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Quadro 16: Parâmetros e pesos para classificação RMR – família J1.

Parâmetros (família J1)	Valores Ponderais
Resistência do material rochoso intacto	1
RQD	3
Espaçamento	5
Persistência	0
Abertura	4
Rugosidade	1
Preenchimento	2
Grau de alteração	1
Infiltração de água	7
RMR	30
Classe RMR	IV

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Quadro 17: Parâmetros e pesos para classificação RMR – famílias J2.

Parâmetros (famílias J2)	Valores Ponderais
Resistência do material rochoso intacto	1
RQD	3
Espaçamento	10
Persistência	0
Abertura	1
Rugosidade	5
Preenchimento	2
Grau de alteração	1
Infiltração de água	7
RMR	34
Classe RMR	IV

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

4.5.2 Slope Mass Rating (SMR)

As análises de SMR também foram feitas separadas de acordo com família de descontinuidade, visto que a orientação influencia muito no resultado. Além das análises de cada família (S0, J1 e J2), foi necessário efetuar uma análise para a cunha que se forma na intersecção entre S0 e J1, por meio da utilização da direção de mergulho e do caimento desta linha comum entre os dois planos.

4.5.2.1 FAMÍLIA S0

A classificação do maciço conforme os parâmetros da família S0, composta pelos planos de acamamento sedimentar, foi feita por meio da obtenção dos coeficientes discretos (ROMANA, 1993) e contínuos (TOMÁS *et al.*, 2007), conforme o Quadro 18. O valor de SMR obtido com coeficientes discretos foi de 21 e com coeficientes contínuos foi de 20 (Quadro 19). Na avaliação conforme coeficientes discretos, a classe do talude é IV, uma classe menos pior do que a obtida por coeficientes contínuos, classe V.

Quadro 18: Valores discretos e contínuos para os coeficientes SMR – família S0.

Coeficientes	Romana (1993)	Tomás et al (2007)
	Valores discretos	Valores contínuos
F1	0.15	0.23
F2	0.4	0.41
F3	-60	-58.64
F1 x F2 x F3	-4	-5
F4	0	

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Quadro 19: Valores discretos e contínuos de SMR e respectiva classificação do maciço – família S0.

Família S0	Discreto	Contínuo
SMR	21	20
Classe	IV	V

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

De acordo com esta classificação, ao adotar a classe mais a favor da segurança, conforme parâmetros da família S0:

- **Descrição:** muito ruim;
- **Estabilidade:** completamente instável;
- **Possíveis rupturas:** planares grandes ou circulares (semelhante a solo);
- **Suporte recomendado:** reescavação ou instalação de muro de gravidade.

4.5.2.2 FAMÍLIA J1

Assim como para a família S0, para a família J1 foram obtidos coeficientes discretos e contínuos (Quadro 20). Em ambos os casos, os fatores de correção ao RMR básico se anulam, de forma que o valor de SMR equivale ao RMR_B . Isto significa que a orientação da família J1 (somada ao método de escavação), por si só, não influencia a estabilidade do talude. Assim, o maciço conforme parâmetros da J1 pertence à classe IV, com um valor SMR de 30 (Quadro 21).

Quadro 20: Valores discretos e contínuos para os coeficientes SMR – família J1.

Coeficientes	Romana (1993)	Tomás et al (2007)
	Valores discretos	Valores contínuos
F1	0.15	0.24
F2	1	0.99
F3	0	-0.55
F1 x F2 x F3	0	0
F4	0	

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Quadro 21: Valores discretos e contínuos de SMR e respectiva classificação do maciço – família J1.

Família J1	Discreto	Contínuo
SMR	30	30
Classe	IV	IV

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

De acordo com esta classificação, conforme parâmetros da família **J1**:

- **Descrição:** ruim;
- **Estabilidade:** instável;
- **Possíveis rupturas:** planares ou grandes cunhas;
- **Suporte recomendado:** utilização sistemática de concreto projetado reforçado, reescavação, instalação de drenos profundos.

4.5.2.3 CUNHA S0/J1

A classificação SMR também foi obtida para o caso de ruptura em cunha, na intersecção entre os planos da família S0 e da família J1. Neste caso, de forma a se obter valores a favor da segurança, utilizou-se o RMR básico da família com piores condições, de 25, da família S0. No Quadro 22, os coeficientes discretos e contínuos obtidos na análise. O valor de SMR obtido com coeficientes discretos foi de 21 e com coeficientes contínuos foi de 20. Na avaliação conforme coeficientes discretos, a classe do talude é IV, uma classe menos pior do que a obtida por coeficientes contínuos, classe V. A intersecção dos dois planos está, naturalmente, contida no plano da S0, e os valores deste plano menos favorável prevalecem, de forma que a análise fica muito similar à análise da S0 sozinha.

Quadro 22: Valores discretos e contínuos para os coeficientes SMR – intersecção entre S0 e J1.

Coeficientes	Romana (1993)	Tomás et al (2007)
	Valores discretos	Valores contínuos
F1	0.15	0.23
F2	0.4	0.41
F3	-60	-58.64
F1 x F2 x F3	-4	-5
F4	0	

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Quadro 23: Valores discretos e contínuos de SMR e respectiva classificação do maciço – intersecção S0 e J1.

SMR cunha S0/J1	Discreto	Contínuo
SMR	21	20
Classe	IV	V

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

De acordo com esta classificação, ao adotar a classe mais a favor da segurança, conforme parâmetros da **cunha S0/J1**:

- **Descrição:** muito ruim;
- **Estabilidade:** completamente instável;
- **Possíveis rupturas:** cunhas grandes ou circulares (semelhante a solo);
- **Suporte recomendado:** reescavação ou instalação de muro de gravidade.

4.5.2.4 FAMÍLIAS J2

Como mencionado no item 4.3.3, as famílias J2 são divididas em J2a e J2b. No Quadro 24, os coeficientes discretos e contínuos obtidos na análise. Em ambos os casos, os fatores de correção ao RMR básico se anulam, de forma que o valor de SMR equivale ao RMR_B . Isto significa que a orientação da família J2a (somada ao método de escavação), por si só, não influencia a estabilidade do talude. Assim, o maciço conforme parâmetros do grupo J2a pertence à classe IV, com um valor SMR de 34 (Quadro 25).

Quadro 24: Valores discretos e contínuos para os coeficientes SMR – família J2a.

Coeficientes	Romana (1993)	Tomás et al (2007)
	Valores discretos	Valores contínuos
F1	0.15	0.22
F2	1	0.99
F3	0	-0.52
F1 x F2 x F3	0	0
F4	0	

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Quadro 25: Valores discretos e contínuos de SMR e respectiva classificação do maciço – família J2a.

SMR Família J2a	Discreto	Contínuo
SMR	34	34
Classe	IV	IV

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

De acordo com esta classificação, conforme parâmetros da família **J2a**:

- **Descrição:** ruim;

- **Estabilidade:** instável;
- **Possíveis rupturas:** tombamento de blocos;
- **Suporte recomendado:** ancoragem, utilização sistemática de concreto projetado, reescavação e instalação de drenos.

Quanto ao grupo J2b, os coeficientes discretos e contínuos obtidos na análise estão presentes no Quadro 26. O valor de SMR obtido com coeficientes discretos foi de 30 e com coeficientes contínuos foi de 33. Para ambos os casos, o maciço conforme parâmetros do grupo J2b pertence à classe IV (Quadro 27). Diferente do grupo J2a, este grupo possui uma estruturação no maciço desfavorável a sua estabilidade, mas ambos ainda pertencem a mesma classe.

Quadro 26: Valores discretos e contínuos para os coeficientes SMR – família J2b.

Coeficientes	Romana (1993)	Tomás et al (2007)
	Valores discretos	Valores contínuos
F1	0.7	0.85
F2	1	1
F3	-6	-0.96
F1 x F2 x F3	-4	-1
F4	0	

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Quadro 27: Valores discretos e contínuos de SMR e respectiva classificação do maciço – família J2b.

SMR Família J2b	Discreto	Contínuo
SMR	30	33
Classe	IV	IV

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

De acordo com esta classificação, conforme parâmetros da família **J2b**:

- **Descrição:** ruim;
- **Estabilidade:** instável;
- **Possíveis rupturas:** tombamento de blocos;
- **Suporte recomendado:** utilização sistemática de concreto projetado reforçado, reescavação, instalação de drenos profundos.

4.5.3 Slope Stability Probability Classification (SSPC)

A seguir serão apresentados os dados SSPC levantados em campo e os fatores de cálculo obtidos posteriormente. Serão apresentados os fatores relativos à estimativa dos parâmetros do maciço de referência, e então aqueles relativos à estabilidade independente de orientação e seu resultado e por fim aqueles relativos à estabilidade dependente de orientação e seu resultado.

4.5.3.1 CARACTERIZAÇÃO SSPC DO AFLORAMENTO

O levantamento de dados das descontinuidades na classificação SSPC é ligeiramente diferente do levantamento de outros sistemas, como abordado no item 3.3. A seguir uma lista dos dados levantados e seus respectivos valores:

- I. Dados do maciço:
 - **Método de escavação (ME):** escavação mecânica (valor 1,00);
 - **Resistência da rocha intacta (IRS):** placas finas se quebram facilmente à mão (valor entre 1,25 e 5 MPa);
 - **Alteração (WE):** completamente alterado (valor 0,35).
- II. Dados das descontinuidades apresentados no Quadro 28.

Quadro 28: Dados SSPC das descontinuidades levantados em campo.

Descontinuidade		S0	J1	J2
Persistência (m)	Ao longo do strike	>20	0.35	2.5
	Ao longo do mergulho	>20	0.2	1.4
Rugosidade em escala grande (R1)		Ondulada: 0.85	Levemente ondulada: 0.80	Ondulada: 0.85
Rugosidade em escala pequena (Rs)		Planar lisa: 0.60	Planar lisa: 0.60	Rugosa com degraus/irregular; 0,95
Preenchimento (Im)		Material mole, fino (argila): 0.55	Material mole, fino (argila): 0.55	Material mole, médio: 0.65
Carste (Ka)		Ausente: 1.00	Ausente: 1.00	Ausente: 1.00

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

4.5.3.2 MACIÇO DE REFERÊNCIA

A partir do cálculo dos fatores SSPC do maciço de referência, é possível estimar seu ângulo de atrito e coesão. O fator WE, referente à alteração do maciço, é utilizado para corrigir os fatores do talude alterado e assim estimar fatores do maciço de referência. A seguir, uma lista com estes fatores corrigidos e os parâmetros do maciço de referência:

I. Fatores SSPC:

- **Resistência da rocha intacta de referência (RIRS):** entre 3,6 e 14,3 MPa;
- **Condição das descontinuidades do maciço de referência (RCD):** 0,804;

II. Parâmetros de resistência do maciço de referência:

- **Ângulo de atrito (RFRI):** 24,66°;
- **Coesão (RCOH):** 13,54 kPa.

4.5.3.3 ESTABILIDADE INDEPENDENTE DE ORIENTAÇÃO

Quanto ao cálculo da probabilidade de estabilidade independente de orientação, foi necessário estimar os parâmetros de resistência do talude:

- **Ângulo de atrito do talude (SFRI):** 8,63°;
- **Coesão do talude (SCOH):** 4,74 kPa.

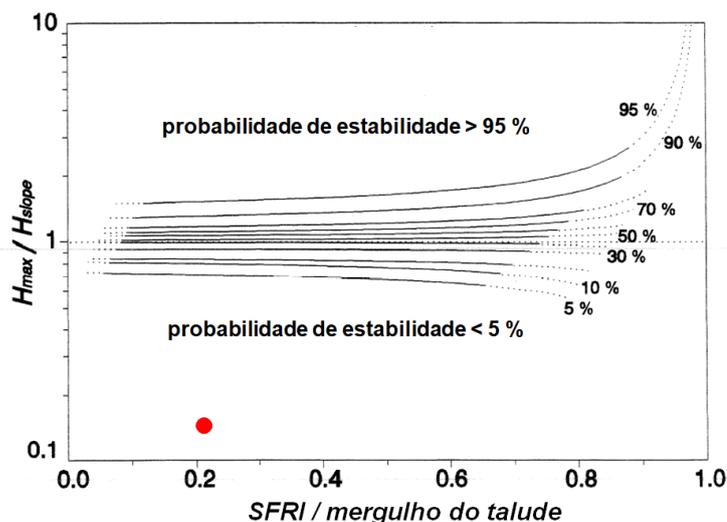
Com estes dois parâmetros, foi possível calcular a altura máxima do talude (**Hmax**): 3,21 m.

Foram calculadas, então, as duas razões dos eixos do gráfico de estabilidade independente de orientação:

- **SFRI/mergulho do talude:** 0,22;
- **Hmax/altura do talude (Hslope):** 0,12.

Assim, a probabilidade de estabilidade independente de orientação é **menor do que 5%**, conforme a Figura 57.

Figura 57: Análise de estabilidade independente de orientação.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

4.5.3.4 ESTABILIDADE DEPENDENTE DE ORIENTAÇÃO

A realização da análise preliminar da estabilidade dependente de orientação foi realizada por meio dos fatores AP de cada família de descontinuidades (fatores relativos ao ângulo aparente entre o mergulho do plano de descontinuidade na direção do mergulho do talude). A seguir são listados os fatores AP de cada família:

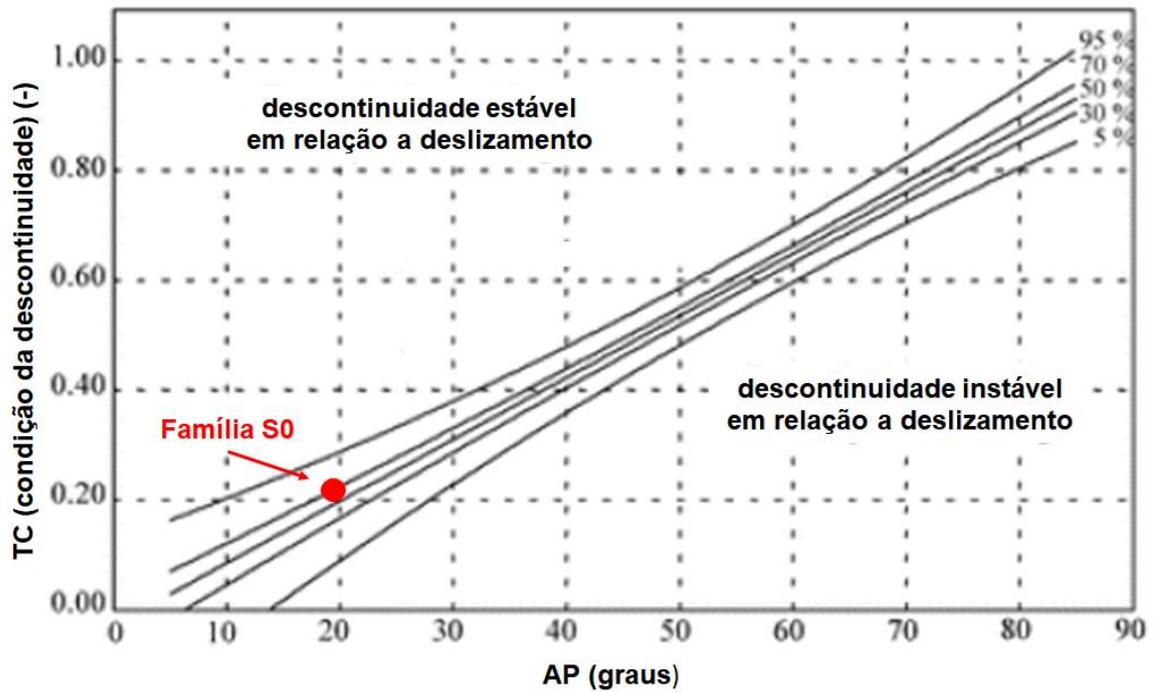
- **Fator AP (S0):** 19,63°;
- **Fator AP (J1):** 70,72°;
- **Fator AP (J2a):** 71,92°;
- **Fator AP (J2b):** -69,72°.

Ao analisar estes fatores sob a ótica do Quadro 8 (apresentada no item 2.3.3), o seguinte resultado é alcançado:

- **Família S0:** utilizar gráfico de ruptura planar;
- **Família J1:** probabilidade de estabilidade de 100% para ruptura planar e tombamento de blocos;
- **Família J2a:** probabilidade de estabilidade de 100% para ruptura planar e tombamento de blocos;
- **Família J2b:** utilizar gráfico de tombamento de blocos.

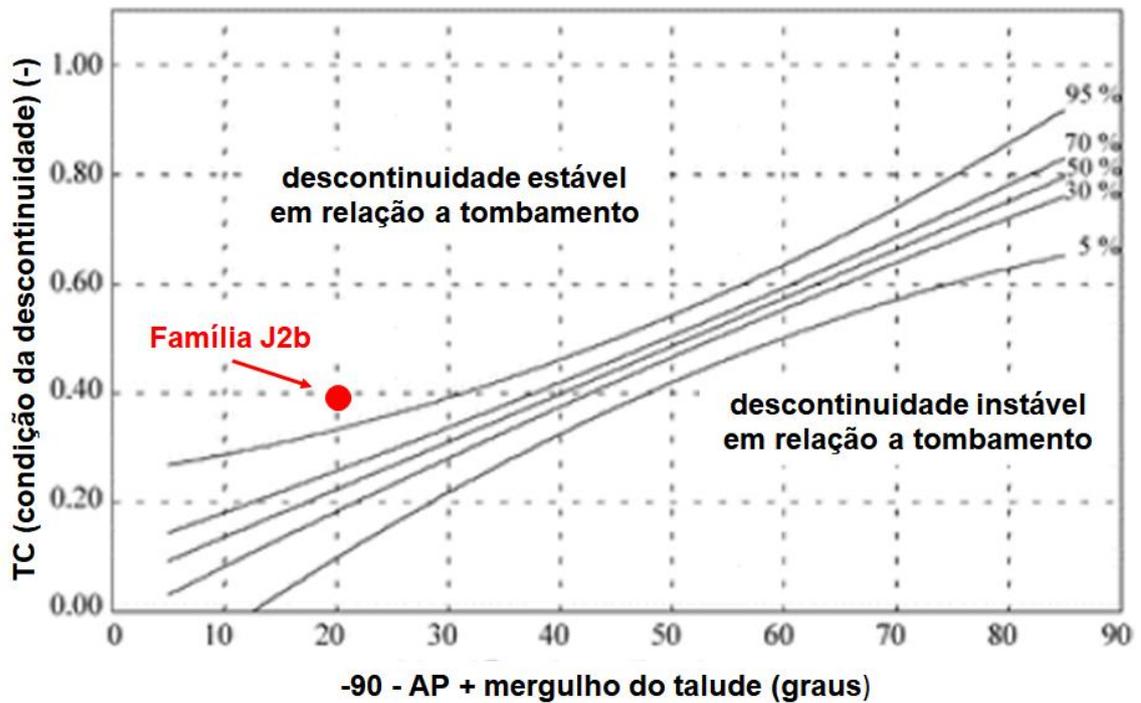
Assim, foi necessário realizar análises adicionais para as famílias S0 e J2b, cujas orientações são desfavoráveis em relação à orientação do talude. A utilização destes gráficos é função não apenas das relações geométricas entre talude e descontinuidade (como na análise preliminar), mas também da condição da descontinuidade. A análise para ruptura planar da família S0 resultou em uma probabilidade de estabilidade de cerca de 70%, conforme a Figura 58. Já a análise para tombamento de blocos da família J2b resultou em uma probabilidade de estabilidade de cerca de 95%.

Figura 58: Análise de estabilidade da família S0 – ruptura planar.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 59: Análise de estabilidade da família J2b – tombamento de blocos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

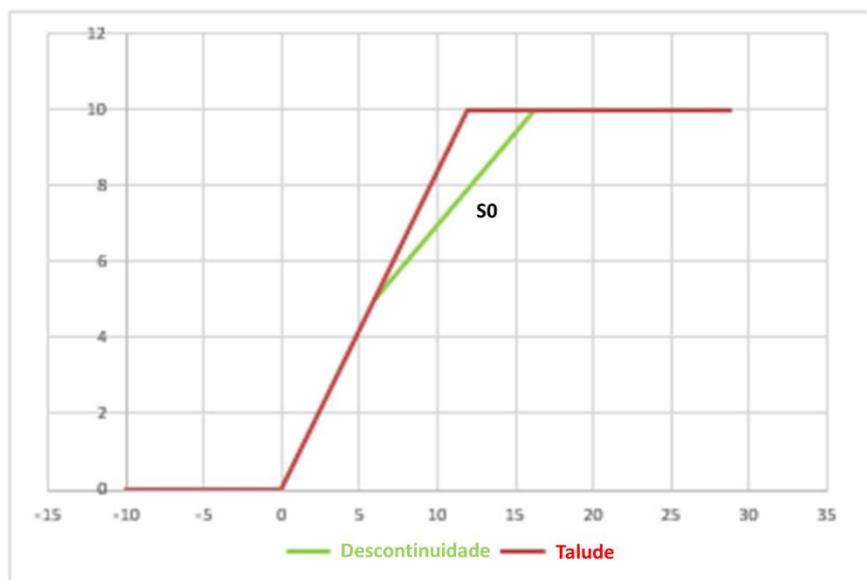
Neste item, é apresentada uma discussão acerca dos resultados obtidos por meio de cada metodologia. As análises executadas visam um mesmo fim: caracterizar o talude quanto à sua estabilidade. Um dos objetivos do trabalho consiste em investigar as semelhanças e diferenças de cada método e, se possível, alcançar um parecer a seu respeito.

O método da análise cinemática é entendido como uma maneira preliminar de avaliar a estabilidade de um talude rochoso descontínuo. Os resultados obtidos, quando vistos sob a luz das outras metodologias e dos deslizamentos pretéritos observados em campo, se confirmam para ruptura planar do plano S0 e para ruptura em cunha dos planos S0 e J1. No entanto, duas outras interseções de planos são acusadas como instáveis nas análises em projeção estereográfica, dados que não se confirmam em campo, possivelmente devido à persistência menor das famílias envolvidas. Como uma avaliação preliminar, portanto, se mostrou bastante viável, também devido à facilidade de execução.

As análises SMR resultaram em valores SMR de 20 a 34. De acordo com Singh e Goel (2011), taludes com valor SMR abaixo de 20 podem se romper com muita facilidade, e que nenhuma encosta com valor menor que 10 foi jamais registrada, pois tais encostas não existiriam fisicamente.

Nessas análises, a família S0 condiciona o valor mais baixo de SMR obtido, 20, classificado como um maciço muito ruim, completamente instável, com possíveis rupturas planares grandes e circulares. Isto é corroborado pelo que se observou em campo e tem respaldo nas condicionantes geométricas obtidas via análise cinemática (Figura 60).

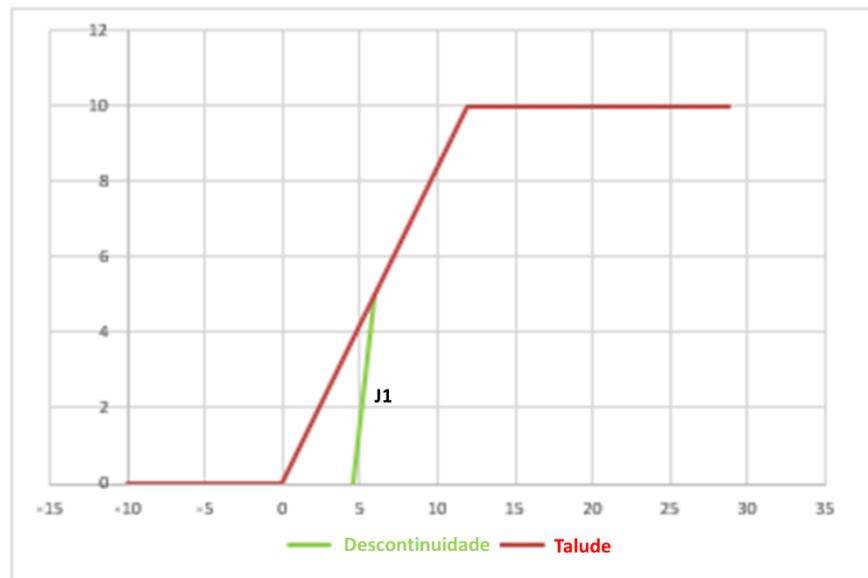
Figura 60: Ilustração das relações geométricas entre descontinuidade S0 e talude.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Quanto à família J1, analisada isoladamente, seu valor SMR de 30 é condicionado apenas pelo RMR básico do talude de acordo com os parâmetros J1. Isso devido à falta de influência geométrica da orientação destas juntas em conjunto com o corte do talude na estabilidade (Figura 61), como também demonstrado pela análise cinemática. A classe SMR conforme J1 é de um maciço ruim, devido às demais condições desfavoráveis destas descontinuidades (exclusive orientação), parâmetros que não entram na análise cinemática.

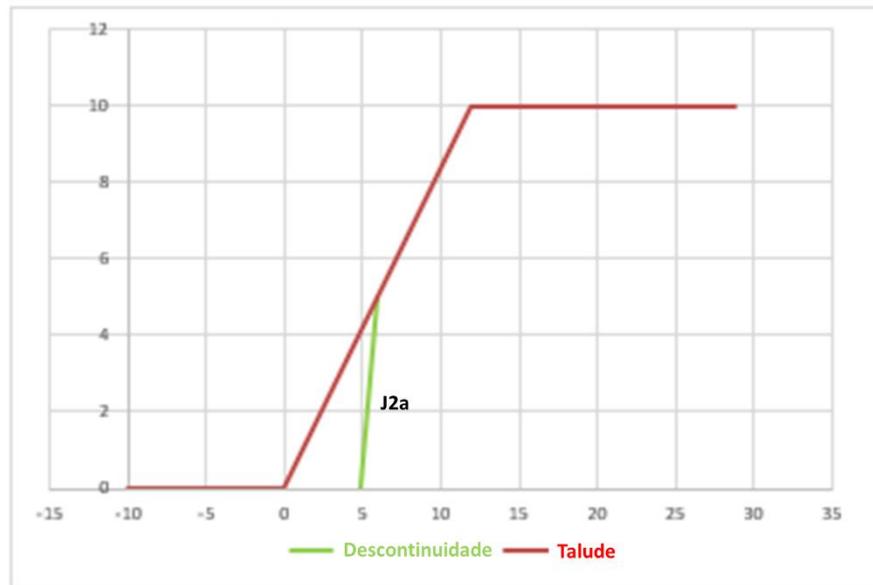
Figura 61: Ilustração das relações geométricas entre descontinuidade J1 e talude.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

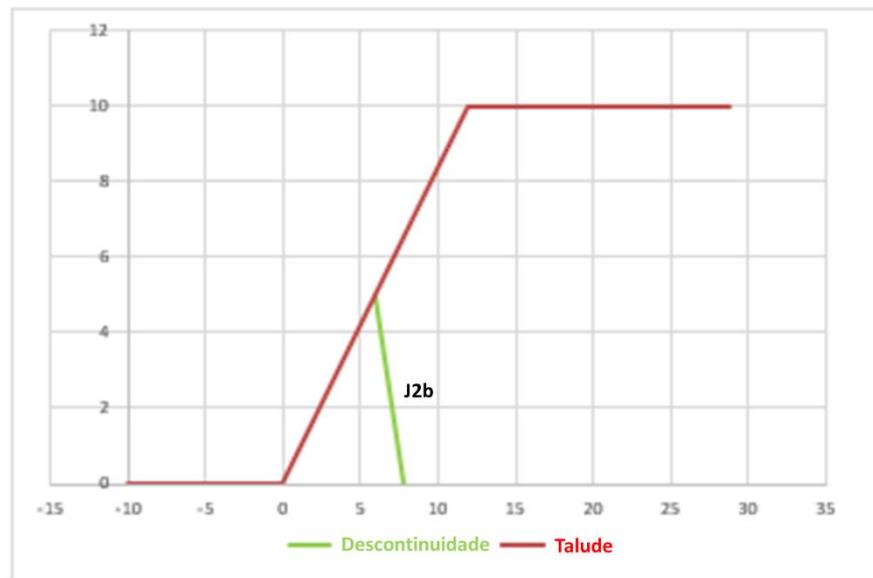
A respeito das famílias J2a e J2b, seus valores estão entre 34 e 30. A família J2a, assim como a J1, tem valor SMR idêntico ao RMR básico, devido a sua orientação irrelevante em relação ao corte do talude (Figura 62), também em acordo com o resultado da análise cinemática. A família J2b, por outro lado, sofreu uma correção de -4 no mesmo valor inicial, com valor SMR de 30, portanto. Isso devido a uma orientação desfavorável para tombamento de blocos (Figura 63), condição não avaliada pela análise cinemática.

Figura 62: Ilustração das relações geométricas entre descontinuidade J2a e talude.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 63: Ilustração das relações geométricas entre descontinuidade J2b e talude.

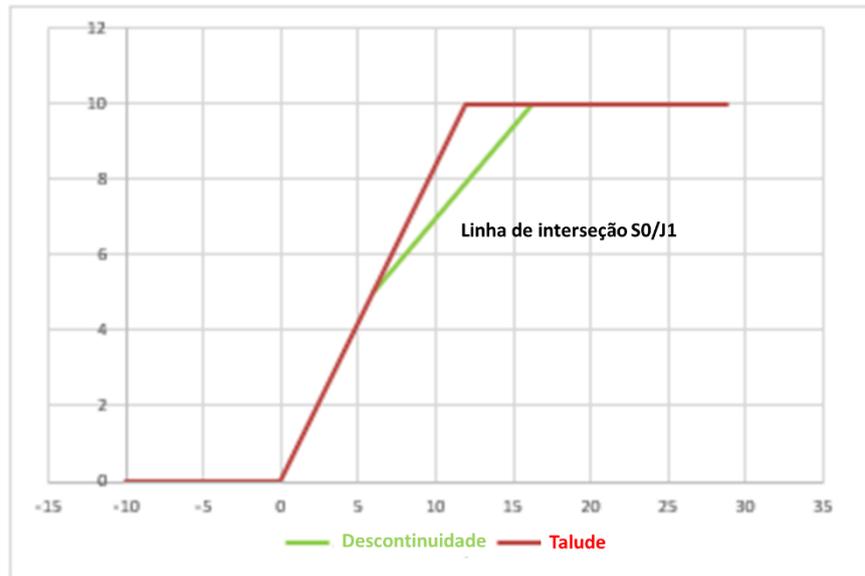


Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

A classificação SMR também possibilita a avaliação para rupturas em cunha, por meio da utilização da linha de interseção de duas descontinuidades. Assim, a cunha S0/J1 apresentou valor SMR de 20, igual ao obtido para a família S0. Essa avaliação também está conforme as condicionantes geométricas indicadas pela análise cinemática (Figura 64). É necessário pontuar que, a rigor, caracterizar os deslizamentos ao longo da S0 como ruptura planar ou em cunha é questão de subjetividade, de ponto de vista. São duas formas de descrever uma mesma configuração de ruptura. Para fins de precisão, o movimento se dá na linha de interseção, mas se não houvesse a família J1 para fornecer a interseção, a

família S0 ainda teria condições geométricas se movimentar.

Figura 64: Ilustração das relações geométricas entre a linha de interseção S0/J1 e talude.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

As análises SSPC envolveram estimativas a respeito do maciço de referência, análise de estabilidade independente de orientação e dependente de orientação (que envolve uma etapa preliminar, que serve como um “filtro” para se executar ou não a análise SSPC propriamente dita).

Na análise de estabilidade SSPC independente de orientação, é feita uma estimativa de coesão e ângulo de atrito do talude: 4,74 kPa e 8,63°, respectivamente. Essa estimativa é consideravelmente mais baixa em relação à obtida via classificação RMR, que estabelece uma faixa de 100 a 200 kPa para coesão e de 15 a 25° para ângulo de atrito. Diferente dos outros métodos, a análise SSPC independente de orientação avalia o talude como um todo, não com base em parâmetros de apenas uma família de descontinuidades. Ainda assim, seu resultado de probabilidade de estabilidade de menos que 5% é condizente com o pior cenário da avaliação SMR, que indica rupturas planares grandes ou circulares (semelhantes a rupturas em solos).

Essa classificação também indica uma altura máxima do talude, de 3,21 m. Dado o histórico do talude, que permaneceu estável por anos antes de ser remodelado, e certamente era mais alto que 3,5 m, é possível que o sistema SSPC superestime os fatores independentes de orientação. Por outro lado, a orientação do talude anterior era também muito similar à atual, o que indica que a altura ou inclinação do remodelamento não tenham sido adequadas para sua estabilidade.

A análise SSPC dependente de orientação preliminar, por sua vez, teve resultados idênticos à análise cinemática, no que diz respeito às famílias de descontinuidades estáveis para deslizamento planar e tombamento de blocos (ruptura em cunha não é analisada por este sistema). Quando da possibilidade

de instabilidade, análises adicionais são efetuadas: o caso da família S0 para ruptura planar e do grupo J2b para tombamento de blocos.

A família S0 condiciona uma probabilidade de estabilidade de 70% para o talude, de acordo com a classificação SSPC. Este resultado destoa do resultado obtido via SMR, que atribui a menor classe para a avaliação do maciço conforme parâmetros S0 (completamente instável). A diferença metodológica que condiciona essa diferença de resultado é a utilização do RMR básico na classificação SMR, que de início já colocou a nota do maciço para baixo, por conta do peso duplo colocado no espaçamento (devido ao parâmetro de espaçamento e ao RQD), por conta utilização da persistência, da abertura e da umidade. Na análise de ruptura planar SSPC, apenas as condições das descontinuidades (rugosidade, preenchimento e carste) da família S0 e a orientação são avaliadas. Enquanto a classificação SMR engloba outra classificação que utiliza mais fatores, não apenas da descontinuidade que condiciona a ruptura, a SSPC considera apenas alguns parâmetros da descontinuidade problemática.

Quanto à análise de tombamento de blocos da família J2b, a classificação SSPC resultou em uma probabilidade de 95% de estabilidade. Nesse caso também há diferença em relação à avaliação SMR, que indica que o maciço é instável para tombamento de blocos conforme parâmetros J2b. No entanto, não há discrepância quanto ao observado em campo, visto que não foram identificadas rupturas deste tipo (possivelmente devido ao alto grau de perturbação no maciço e ao tamanho de blocos diminuto).

Em suma, os resultados obtidos apresentam um bom alinhamento quanto a suas indicações de estabilidade, exceto nos dois casos apresentados por último. No Quadro 29, há um resumo comparativo dos resultados obtidos para cada condição de acordo com as metodologias e com sua ocorrência em campo.

O questionamento de até que ponto as disparidades entre SSPC e SMR indicam fragilidade em metodologia merece mais estudo, no entanto. Em termos práticos, a classificação SSPC, por meio da análise independente de estabilidade indica que o talude não se encontra em condições de se manter de pé, o objetivo em última instância de qualquer avaliação geomecânica. Em termos de alinhamento com o que se observou em campo, a classificação SMR se mostrou mais apropriada, o que está de acordo com a conclusão de Moon, Russel e Stewart (2001) sobre a aplicação dessa metodologia em taludes de rocha branda. De toda forma, qualquer dos métodos, executado de forma apropriada, dá a resposta necessária à questão da estabilidade do talude e impede que vidas e propriedades sejam colocadas em risco (tomadas as devidas medidas de prevenção ou correção).

Quadro 29: Resumo e comparação dos resultados.

Condição	Análise cinemática	RMRb	SMR	SSPC	Ocorrência em campo
Ruptura planar - S0	Instável	Não avaliado	Totalmente instável	70% de estabilidade	Sim
Ruptura planar - J1	Estável	Não avaliado	Instável *	Estável	Não
Ruptura planar - J2a	Estável	Não avaliado	Instável *	Estável	Não
Tombamento de blocos J2b	Não avaliado	Não avaliado	Instável	95% de estabilidade	Não observado
Cunha S0/J1	Instável	Não avaliado	Totalmente instável	Não avaliado	Sim
Ruptura circular/independente de orientação	Não avaliado	Não avaliado	Possível	< 5%	Sim
Estimativa de coesão (kPa)	Não avaliado	100 a 200	Não avaliado	4,74	Não se aplica
Estimativa de ângulo de atrito	Não avaliado	15 a 25°	Não avaliado	8,63°	Não se aplica

*Instabilidade devido a RMRb baixo, sem influência da orientação da descontinuidade.

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

6 CONCLUSÕES

A elaboração deste documento e todas suas etapas de trabalho possibilitaram a obtenção de conhecimentos valiosos a respeito não apenas do objeto específico estudado (talude de siltito às margem da BR-470 em Gaspar), mas também a respeito do campo mais amplo da estabilidade de taludes rochosos e mecânica de rochas. O desafio maior quanto à avaliação da estabilidade de taludes em rocha branda reside no peso atribuído aos parâmetros da rocha intacta em relação aos parâmetros das descontinuidades que enfraquecem o maciço. Ou então entre os parâmetros independentes de orientação e os dependentes de orientação (divisão não necessariamente correspondente à anterior) – nessa diferença de pesos reside a diferença entre as análises em SSPC e SMR.

Assim, a partir da realização e dos resultados desse estudo, é possível pontuar que:

- O histórico de imagens de satélite indica que o talude estudado rompeu logo após ter sua forma anterior modificada, em não mais que um ano;
- O talude é cortado por quatro famílias principais de descontinuidades: S0, J1 e J2a e J2b;
- A gênese litoestrutural do talude se relaciona à evolução da Bacia do Itajaí, desde a deposição sedimentar até sua deformação por dobramentos e posteriormente falhamentos;
- A análise cinemática indicou que a família S0 se encontra instável para ruptura planar, sua interseção com a família J1 se encontra instável para ruptura em cunha, assim como sua interseção com a família J2a, e que a interseção de planos da família J2a entre si se encontram instáveis para ruptura em cunha;
- A classificação RMR básica resultou em um maciço de rocha ruim, classe IV, de acordo com parâmetros de cada família:
 - Família S0: RMRb 25, classe IV;
 - Família J1: RMRb 30, classe IV;
 - Família J2: RMRb 34, classe IV;
- As análises SMR tiveram os seguinte menores resultados de acordo com cada família:
 - Família S0: SMR 20, classe V;
 - Família J1: SMR 30, classe IV;
 - Família J2a: SMR 34, classe IV;
 - Família J2b: SMR 30, classe IV;
 - Cunha S0/J1: SMR 20, classe V;
- A estabilidade, as possíveis rupturas e medidas corretivas recomendadas de acordo com o sistema SMR para cada análise são, respectivamente:
 - Família S0: completamente instável. Rupturas planares grandes ou circulares.

Reescavação ou instalação de muro de gravidade para contenção;

- Família J1: instável. Planares ou grandes cunhas. Utilização sistemática de concreto projetado reforçado, reescavação ou instalação de drenos profundos para contenção;
 - Família J2: instável. Tombamento de blocos. Ancoragem, utilização sistemática de concreto projetado, reescavação e instalação de drenos para contenção;
 - Cunha S0/J1: completamente instável. Cunha grandes ou circular (semelhante a solo). Reescavação ou instalação de muro de gravidade para contenção;
- A classificação SMR se mostrou mais precisa do que a classificação RMR básica, ao atribuir valores menores para o talude, comprovadamente instável pelos deslizamentos pretéritos;
 - A classificação SSPC resultou em uma estimativa de altura máxima do talude e em duas análises probabilísticas de estabilidade:
 - Altura máxima do talude: 3,21 m.
 - Probabilidade de estabilidade independente de orientação: menor que 5%;
 - Na probabilidade de estabilidade dependente de orientação, os resultados preliminares de estabilidade concordaram com a análise cinemática (são praticamente a mesma coisa); os resultados para as descontinuidades instáveis de acordo com a análise cinemática:
 - A análise para ruptura planar da família S0 resultou em uma probabilidade de estabilidade de cerca de 70%;
 - A análise para tombamento de blocos da família J2b resultou em uma probabilidade de estabilidade de cerca de 95%.
 - As análises concordam quanto à extrema instabilidade do talude, ainda que com diferenças quanto a mecanismos (SSPC atribui a maior parte da instabilidade a fatores independentes de orientação e não avalia ruptura em cunha);
 - O sistema SMR se mostrou adequado para a avaliação de taludes de rocha branda nas condições climáticas da região;
 - O sistema SSPC ainda precisa de mais testes em contexto climático brasileiro, visto que foi criado em contexto europeu e resultou em avaliações divergentes em relação ao sistema SMR.

7 REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, R. P.; JANIKIAN, L.; FRAGOSO-CESAR, A. R. S.; FAMBRINI, G. L. The Ediacaran to Cambrian rift system of Southeastern South America: tectonic implications. **The Journal of Geology**, v. 118, n. 2, p. 145-161, 2010.
- ASSIS, D. M. G. Classificações geomecânicas aplicadas a taludes rochosos. Contribuição para a sua utilização com aplicações móveis. 2016.
- BARTON, N.; LIEN, R.; LUNDE, J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. **Rock mechanics**, v. 6, n. 4, p. 189-236, 1974.
- BASEI, M. A. S.; DRUKAS, C. O.; NUTMAN, A. P.; WEMMER, K.; DUNYI, L.; SANTOS, P. R.; PASSARELLI, C. R.; CAMPOS NETO, M.C.; SIGA O.; OSAKO, L. The Itajaí foreland basin: a tectono-sedimentary record of the Ediacaran period, Southern Brazil. **International Journal of Earth Sciences**, v. 100, n. 2-3, p. 543-569, 2011.
- BIENIAWSKI, Z. T. Geomechanics classification of rock masses and its application in tunneling. In: **Proc. 3rd Int. Congress on Rock Mechanics**. 1974.
- BIENIAWSKI, Z. T. **Rock mechanics design in mining and tunnelling**. 1984.
- CALCATERRA, D.; GILI, J. A.; IOVINELLI, R. Shallow landslides in deeply weathered slates of the Sierra de Collcerola (Catalonian Coastal Range, Spain). **Engineering geology**, v. 50, n. 3-4, p. 283-298, 1998.
- CANAL, A.; AKIN, M. Assessment of rock slope stability by probabilistic-based Slope Stability Probability Classification method along highway cut slopes in Adilcevaz-Bitlis (Turkey). **Journal of Mountain Science**, v. 13, n. 11, p. 1893-1909, 2016.
- CARDOZO, N.; ALLMENDINGER, R. W. 2013. **Spherical projections with OSXStereonet**. *Computers & Geosciences*, v. 51, no. 0, p. 193 - 205, doi: 10.1016/j.cageo.2012.07.021
- CHEMALE JR, F.; MALLMANN, G.; BITENCOURT, M. F.; KAWASHITA, K. Isotope geology of syntectonic magmatism along the Major Gercino Shear Zone, southern Brazil: implications for the timing of deformation events. In: **Symposium on Isotope Geology**. 2003.

COSTA, M. S. **A sedimentação neoproterozóica na Bacia do Itajaí, leste da Santa Catarina: paleoambientes, composição e diagênese de arenitos.** 2014. 107f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

FIORI, A. P; CARMIGNANI, L. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas.** Oficina de Textos, 2013.

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

GOOGLE LLC. **GOOGLE EARTH.** Versão 7.3. Disponível em: https://www.google.com/intl/pt-BR_ALL/earth/versions/#earth-pro. Acesso em: 22 abr. 2020.

HACK, R. **Slope stability probability classification: SSPC.** 1998.

HACK, R. An evaluation of slope stability classification. In: **ISRM International Symposium-EUROCK 2002.** International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, 2002.

HACK, R.; PRICE, D.; RENGERS, N. A new approach to rock slope stability—a probability classification (SSPC). **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 62, n. 2, p. 167-184, 2003.

HOEK, E.; BRAY, J. W. **Rock slope engineering.** Inst. Mining and metallurgy, London, 1981.

HUDSON, J. A.; HARRISON, J. P. **Engineering rock mechanics: an introduction to the principles.** Elsevier, 2000.

ISRM (International Society for Rock Mechanics) (1978) **Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses.** International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 15, 319-368, 1978.

KARAMAN, K.; ERCIKDI, B.; KESIMAL, A. The assessment of slope stability and rock excavatability in a limestone quarry. **Earth Sciences Research Journal**, v. 17, n. 2, p. 169-181, 2013.

KREBS, A.S.J.; SILVA, M.A.S.; DIAS, A.A.; LOPES, R.C.; CAMOZZATO, E. O Grupo Itajaí na Folha Botuverá (SC): Modelo geométrico/cinemático e relações com o cinturão metavulcano-sedimentar Brusque - Instalação, preenchimento e inversão da bacia. In: **Congresso Brasileiro de**

Geologia, 36, Natal. Anais. Natal, SBGEO, 6: 2966-2975. 1990.

LISLE, R. J.; LEYSHON, P. R. **Técnicas de projeção estereográfica para geólogos e engenheiros civis**. Editora da UFSC. 2018

MOON, V.; RUSSELL, G.; STEWART, M. The value of rock mass classification systems for weak rock masses: a case example from Huntly, New Zealand. **Engineering geology**, v. 61, n. 1, p. 53-67, 2001.

NIEHUES, B. **Caracterização, parametrização e análise da estabilidade de um talude rochoso do contorno rodoviário de Florianópolis, em São José - SC**. 2019. 92p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

PALMSTRÖM, A. The volumetric joint count-a useful and simple measure of the degree of rock jointing. **Proc. 4th Int. Cong. Int. Assoc. Eng. Geol.**, v. 5, p. 221-228, 1982.

PANTELIDIS, L. Rock slope stability assessment through rock mass classification systems. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 46, n. 2, p. 315-325, 2009.

PASTOR, J. L.; RIQUELME, A. J.; TOMÁS, R.; CANO, M. Clarification of the slope mass rating parameters assisted by SMRTTool, an open-source software. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, p. 1-12, 2019.

PRIEST, S. D.; HUDSON, J. A. Discontinuity spacings in rock. In: **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**. Pergamon, 1976. p. 135-148.

PRIEST, S. D.; HUDSON, J. A. Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys. In: **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**. Pergamon, 1981. p. 183-197.

RIQUELME, A.; TOMÁS, R.; ABELLÁN A. SMRTTool beta. **A calculator for determining Slope Mass Rating (SMR)**. Universidad de Alicante. Website: <http://personal.ua.es/en/ariquelme/smrtool.html> (26/06/2019). License: Creative Commons BY-NC-SA. 2014

ROMANA, M. New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes.

In: **Proceedings of the international symposium on role of rock mechanics, Zacatecas, Mexico.** 1985.

ROMANA, M.; TOMÁS, R.; SERÓN, J. B. Slope mass rating (SMR) geomechanics classification: thirty years review. In: **13th ISRM International Congress of Rock Mechanics.** International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015.

SCHROEDER, G. S. **Análise tectônica da Bacia do Itajaí.** 2006. 109 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

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

SINGH, B.; GOEL, R. K. **Engineering rock mass classification: tunneling, foundations, and landslides.** Waltham, MA: Butterworth-Heinemann,, 2011.

SOARES, G. B.; PISSATO, E.; LIMA, L. R. Utilização de método gráfico para para classificação geomecânica pelo sistema slope mass rating (SMR) - Aplicação na mina de Santaluz (BA). **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (RBGEA)**, v. 4 n. 2, p. 65-93, 2016.

TOMÁS, R.; CUENCA, A.; CANO, M.; GARCÍA-BARBA, J. A graphical approach for slope mass rating (SMR). **Engineering Geology**, v. 124, p. 67-76, 2012.

WALTHAM, T. **Foundations of Engineering Geology.** Spon Press, 2002.

WILDNER, W.; CAMOZZATO, E.; TONIOLO, J.A.; BINOTTO, R.B.; IGLESIAS, C.M.F.; LAUX, J.H. **Mapa geológico do estado de Santa Catarina.** Porto Alegre: CPRM, 2014. Escala 1:500.000. Programa Geologia do Brasil. Subprograma de Cartografia Geológica Regional.

WYLLIE, D.C.; MAH, C.W. **Rock Slope engineering: Civil and Mining.** CRC Press, 2004.