



CEFET-MG

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ**

FILIFE FONSECA DE CAMPOS

**ESTUDO DA ESTABILIDADE DE UM TALUDE DE FILITO NA
REGIÃO METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE**

ARAXÁ/MG

2020

FILIPPE FONSECA DE CAMPOS

**ESTUDO DA ESTABILIDADE DE UM TALUDE DE FILITO NA
REGIÃO METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Me. Allan Erlikhman
Medeiros Santos

ARAXÁ/MG

2020

FOLHA DE APROVAÇÃO
FILIPE FONSECA DE CAMPOS

**ESTUDO DA ESTABILIDADE DE UM TALUDE DE FILITO NA
REGIÃO METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

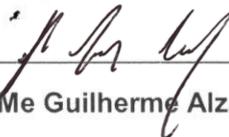
Araxá, 04 de dezembro de 2020.



Presidente e Orientador: Prof. Me. Allan Erlichman Medeiros Santos
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá



Membro Titular: Prof. Me Marcélio Prado Fontes
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá



Membro Titular: Me Guilherme Alzamora Mendonça
Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP

AGRADECIMENTOS

Agradeço muito aos meus pais, que sempre me incentivaram e me deram todo o suporte emocional e financeiro para que eu pudesse prosseguir com minha vida estudantil e concluir mais essa complexa fase acadêmica.

Sou extremamente grato ao meu orientador, Allan, que me auxiliou durante toda a elaboração deste trabalho com muita paciência, profissionalismo e organização; e também contribuiu muito com seu conhecimento técnico na correção e polimento dos conceitos e cálculos presentes neste estudo.

Aos meus amigos, um grande obrigado pelo apoio e descontração que me proporcionaram durante a passagem por todo este período extenuante.

RESUMO

A expansão constante de grandes centros urbanos nem sempre vem acompanhado de um planejamento urbano o que pode levar a diversos problemas, dentre eles os deslizamentos de taludes, principalmente em estações chuvosas. O presente trabalho apresenta um estudo de estabilidade de um talude de filito, denominado CAS-02, localizado na rua Inspetor José Aparecido no bairro São Bento em Belo Horizonte, Minas Gerais. As análises realizadas levam em consideração os dados coletados em campo pelos trabalhos elaborados por ÁVILA (2012). A metodologia aplicada foi a compilação dos dados de campo dos trabalhos anteriores, realização da análise cinemática e em seguida o estudo de estabilidade para os modos de ruptura. No talude em estudo foram identificadas três famílias de descontinuidades, a partir das quais foi feita a análise cinemática, que identificou probabilidades de 37,5% para mecanismos de ruptura planar e 55,26% para mecanismos de ruptura em cunha. Posto isso, o estudo de estabilidade para os diferentes tipos de ruptura foi aplicado, resultando em fatores de segurança com valores muito acima de 1, indicando que a área é estável. Os resultados corroboram com o que é visto na prática haja vista que não existem blocos soltos em campo, e não foram encontrados relatos de deslizamentos de blocos na área. Embora os resultados não indiquem problemas graves para a área em estudo a presente pesquisa contribui com um estudo de estabilidade para uma área urbana de Belo Horizonte, indicando os principais modos de ruptura além de um estudo de estabilidade indicando os fatores de segurança para cada tipo de ruptura.

Palavras-chave: Análise de estabilidade, análise cinemática, parâmetros geotécnicos, fator de segurança, mecânica de rochas.

ABSTRACT

The constant expansion of large urban centers is not always accompanied by urban planning, which can lead to several problems, among them the landslides, especially in rainy seasons. The present work presents a stability study of a filite slope, called CAS-02, located at Rua Inspetor José Aparecido in the São Bento neighborhood in Belo Horizonte, Minas Gerais. The analysis carried out take into account the data collected in the field by the works prepared by ÁVILA (2012). The methodology applied was the compilation of field data from previous works, carrying out the kinematic analysis and then the study of stability for the failure modes. On the slope under study, three families of discontinuities were identified, from which the kinematic analysis was performed, which identified probabilities of 37.5% for planar failure mechanisms and 55.26% for wedge failure mechanisms. That said, the stability study for the different types of failure was applied, resulting in factors of safety with values well above 1, indicating that the area is stable. The results corroborate with what is seen in practice since there are no loose blocks in the field, and there were no reports of block landslides in the area. Although the results do not indicate serious problems for the area under study, the present research contributes to a stability study for an urban area of Belo Horizonte, indicating the main modes of disruption in addition to a stability study indicating the safety factors for each type of break.

Keywords: Stability analysis, Kinematic analysis, geotechnical parameters, factor of safety, rock mechanics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa geológico com a indicação dos afloramentos estudados, adaptado do mapa estadual de Minas Gerais (CPRM).	13
Figura 2 - Estimativa do GSI para maciços fraturados.....	21
Figura 3 - Representação do efeito escala.	22
Figura 4 - Seção longitudinal demonstrando a geometria do talude e planos formando uma ruptura planar.	24
Figura 5 - Superfícies de alívio em cada extremidade de uma ruptura planar.	24
Figura 6 - Representação estereográfica de uma análise cinemática de ruptura planar.	25
Figura 7 - Vista superior de uma ruptura em cunha, exemplificando sua geometria.	26
Figura 8 - Condições geométricas para uma ruptura em cunha, observadas através de uma seção longitudinal e correlacionando ângulos à linha de interseção.	27
Figura 9 - Representação estereográfica de uma análise cinemática de ruptura em cunha.....	28
Figura 10 - Estágios de ruptura por tombamento de larga escala em talude.....	29
Figura 11 - Representação estereográfica de uma análise cinemática de ruptura por tombamento flexural.	30
Figura 12 – Esquema de distribuição de forças em um talude.	34
Figura 13 - Vista da face do talude composto pelo maciço de filito, CAS-02.....	37
Figura 14 - Polos e projeções das nove descontinuidades que compõem a Família 1.	41
Figura 15 - Média da atitude da Família 1.....	42
Figura 16 - Polos e projeções das oito descontinuidades que compõem a Família 2.....	43
Figura 17 - Média da atitude da Família 2.....	44
Figura 18 - Polos e projeções das duas descontinuidades que compõem a Família 3.	45
Figura 19 - Média da atitude da Família 3.....	46
Figura 20 - Análise cinemática para ruptura planar envolvendo as três famílias de descontinuidades.	48
Figura 21 - Análise cinemática para ruptura em cunha envolvendo as três famílias de descontinuidades.	50
Figura 22 - Análise cinemática para ruptura por tombamento flexural envolvendo as três famílias de descontinuidades.....	52
Figura 23 - Análise cinemática para ruptura por tombamento flexural envolvendo as três famílias de descontinuidades.....	53
Figura 24 - Vista bidimensional do bloco formado, representando uma seção do talude.....	55
Figura 25 - Modelo tridimensional do bloco formado (em marrom), representando o talude em perspectiva.	56
Figura 27 - Vista frontal do talude apresentando a cunha formada pela interseção entre as famílias 1 e 2.	57
Figura 28 - Vista superior do talude apresentando a cunha formada pela interseção entre as famílias 1 e 2.	58
Figura 29 - Vista em perfil do talude apresentando a cunha formada pela interseção entre as famílias 1 e 2.	58
Figura 30 - Vista frontal do talude apresentando a cunha formada pela interseção entre as famílias 1 e 3.	59
Figura 31 - Vista superior do talude apresentando a cunha formada pela interseção entre as famílias 1 e 3.	59

Figura 32 - Vista em perfil do talude apresentando a cunha formada pela interseção entre as famílias 1 e 3.	60
Figura 33 - Vista frontal do talude apresentando a cunha formada pela interseção entre as famílias 2 e 3.	60
Figura 34 - Vista superior do talude apresentando a cunha formada pela interseção entre as famílias 2 e 3.	61
Figura 35 - Vista em perfil do talude apresentando a cunha formada pela interseção entre as famílias 2 e 3.	61

LISTA DE TABELAS

<u>Tabela 1 - Rock Mass Rating</u>	17
<u>Tabela 2 - Determinação do peso do parâmetro condições das descontinuidades</u>	18
<u>Tabela 3 - Classes de orientação das descontinuidades em escavações de túneis</u>	19
<u>Tabela 4 - Pesos para correção do RMR básico</u>	19
<u>Tabela 5 - Classificação do maciço rochoso pelo RMR</u>	19
<u>Tabela 6 - Classificação de maciços rochosos de acordo com o RMR</u>	20
<u>Tabela 7 - Resumo dos resultados obtidos na classificação de cada família de descontinuidade no sistema RMR</u>	36
<u>Tabela 8 – Resumo dos parâmetros considerados na análise cinemática</u>	38
<u>Tabela 9 – Parâmetros considerados na análise para ruptura planar</u>	38
<u>Tabela 10 - Parâmetros considerados na análise para ruptura em cunha</u>	39
<u>Tabela 11 - Resumo das medidas realizadas no maciço de filito</u>	40

SUMÁRIO

RESUMO	5
ABSTRACT	6
LISTA DE FIGURAS.....	7
LISTA DE TABELAS.....	9
SUMÁRIO.....	10
1. INTRODUÇÃO	12
2. JUSTIFICATIVA	14
3. OBJETIVOS.....	15
4. REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
4.1. Maciço Rochoso, rocha intacta e descontinuidades.....	16
4.2. Classificação de maciços rochosos.....	16
4.2.1. Rock Mass Rating (RMR)	17
4.2.2. Geological Strength Index (GSI).....	20
4.3. Efeito Escala	21
4.4. Estabilidade de Taludes Rochosos	22
4.4.1. Análise Cinemática	23
4.4.1.1. Ruptura Planar	23
4.4.1.2. Ruptura em cunha.....	25
4.4.1.3. Ruptura por Tombamento	28
4.4.2. Critérios de resistência	30
4.4.2.1. Critério de resistência de Mohr-Coulomb.....	30
4.4.2.2. Critério de resistência de Hoek-Brown	31
4.4.3. Análise de estabilidade determinística	32
4.5. Considerações sobre o trabalho de ÁVILA (2012).....	34
4.5.1. Resultados e Conclusões de ÁVILA (2012)	35
5. METODOLOGIA.....	36
5.1. Descrição do talude estudado.....	36
5.2. Métodos aplicados	37
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
6.1. Reprodução da definição das famílias de acordo com ÁVILA (2012).....	40
6.1.1. Família 1	40
6.1.2 Família 2	42
6.1.3. Família 3	44
6.2 Reprodução da Análise Cinemática de acordo com ÁVILA (2012).....	46
6.2.1 Análise cinemática por ruptura planar.....	47

6.2.2	Análise cinemática para ruptura em cunha	49
6.2.3	Análise cinemática para ruptura por tombamento direto	51
6.2.4	Análise cinemática para ruptura por tombamento flexural	53
6.3	Estudo de estabilidade	54
6.3.1	Estudo de estabilidade para ruptura planar	54
6.3.1.1	Representação Gráfica, Ruptura Planar	55
6.3.2	Estudo de estabilidade para ruptura em cunha	56
6.3.2.1	Interseção entre as Famílias 1 e 2	57
6.3.2.2	Interseção entre as Famílias 1 e 3	58
6.3.2.3	Interseção entre as Famílias 2 e 3	60
7.	CONCLUSÃO	62
8.	BIBLIOGRAFIA	63

1. INTRODUÇÃO

Estudos geotécnicos são realizados com o intuito de facilitar a compreensão dos diversos parâmetros e forças que agem sobre o maciço rochoso, permitindo o emprego de obras de engenharia e solução de problemas estruturais. Dados levantados através de investigação geotécnica são comumente empregados em análise de estabilidade de taludes, onde permitem a realização de cálculos e estimativas de possibilidade de ruptura. A ausência de estudos de estabilidade pode levar a rupturas imprevistas de talude, que podem pôr em risco tanto pessoas quanto equipamentos e prejudicar estruturalmente outras porções do maciço.

Segundo MAIA *et al.* (2010) características de um talude podem, ser utilizadas para se definir através de metodologias determinísticas o nível mínimo de segurança necessário para que não haja particulares modos de ruptura. Estes parâmetros podem ser, por exemplo, suas dimensões, inclinação de sua face, presença de água em seu interior, assim como parâmetros geotécnicos do maciço rochoso e o comportamento das famílias de descontinuidades que se encontram em seu interior.

O presente trabalho traz um estudo de estabilidade para um talude rochoso em uma área urbana na região metropolitana de Belo Horizonte. Os primeiros estudos neste maciço foram iniciados por ÁVILA (2012). A Figura 1 apresenta a localização dos dois maciços estudados no mapa geológico da área em estudo.

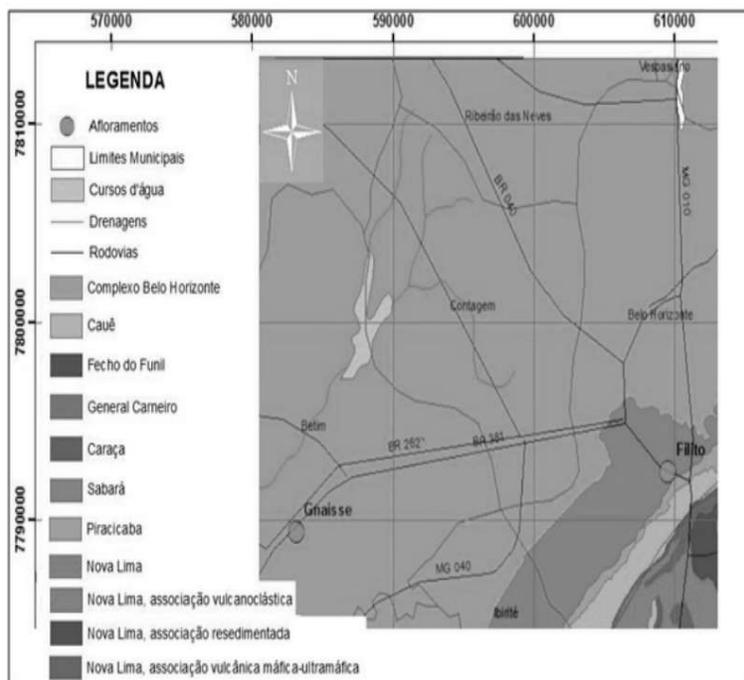


Figura 1 - Mapa geológico com a indicação dos afloramentos estudados, adaptado do mapa estadual de Minas Gerais (CPRM).

Fonte: ÁVILA (2012).

ÁVILA (2012) estudou dois maciços rochosos na região metropolitana de Belo Horizonte, em diferentes litologias, um maciço em gnaíse e um maciço em filito, conforme Figura 1. O citado autor realizou a caracterização geomecânica dos maciços rochosos, considerando a determinação da classificação dos maciços e o levantamento estrutural das descontinuidades, indicando as famílias de descontinuidades.

A presente pesquisa deu continuidade a este estudo de ÁVILA (2012) para um dos maciços rochosos, especificamente o maciço em filito. Assim, foram compilados os principais resultados de ÁVILA (2012) para o maciço em filito e posteriormente realizadas a análise cinemática identificando os possíveis modos de ruptura. O estudo final foi a análise de estabilidade para os possíveis modos de ruptura identificados no talude em questão.

2. JUSTIFICATIVA

No contexto de um planejamento urbano a análise de estabilidade de taludes desempenha um papel importante, podendo evitar problemas como deslizamento de blocos. Porém, na maioria das vezes a expansão urbana não vem acompanhada de um planejamento prévio resultando em deslizamentos que ocasionam prejuízos, tais como perdas de vidas, danos estruturais e econômicos.

Posto isso, a justificativa do trabalho é a contribuição com um estudo de estabilidade para um talude rochoso em uma região urbana. No caso a região urbana se trata da região metropolitana de Belo Horizonte que apresenta considerável fluxo de pessoas e serviços. A escolha do maciço em filito ocorreu devido à sua localização, haja vista que se encontra em um bairro urbano. Assim, a presente pesquisa optou pelo estudo de estabilidade deste talude em específico.

3. OBJETIVOS

O objetivo geral da presente pesquisa é a determinação dos possíveis mecanismos de rupturas e análise de estabilidade de um talude urbano na região metropolitana de Belo Horizonte. Para isso, o trabalho tem como objetivos específicos:

- Estudo do trabalho de ÁVILA (2012): levantamento dos resultados obtidos para o talude de filito;
- Reprodução da análise cinemática realizada por ÁVILA (2012): determinação dos principais modos de ruptura.
- Análise de estabilidade: determinação do fator de segurança para os modos de rupturas identificados.

4. REFERENCIAL TEÓRICO

4.1. Maciço Rochoso, rocha intacta e descontinuidades

A presente pesquisa utiliza o maciço rochoso como material de engenharia, logo algumas definições iniciais são necessárias. Assim, de acordo com ASSIS (2013), rocha intacta é a parte do material que não possui descontinuidades predominantes, apesar de existirem pequenas fraturas, fissuras e vazios (micro-escala). Já as descontinuidades (planos de fraqueza) são quaisquer feições que apresentem quebra do padrão de propriedades mecânicas e podem controlar o comportamento do maciço rochoso (macro-escala).

Maciço rochoso é qualquer massa de rocha tendo ou não descontinuidades. O comportamento de um maciço rochoso será função da rocha intacta e das descontinuidades. Por exemplo, no caso da permeabilidade de um maciço rochoso, esta será função da permeabilidade primária (permeabilidade da rocha intacta) e da permeabilidade secundária (permeabilidade das descontinuidades) (ASSIS, 2013).

Posto isso, considera-se maciço rochoso, para a mecânica de rochas, como um conjunto de blocos do material rocha definidos pela interseção de conjuntos de famílias de descontinuidades.

4.2. Classificação de maciços rochosos

As inúmeras formas de classificação de maciços rochosos existentes têm como objetivo comum caracterizar diversos tipos de maciços rochosos através de um conjunto de parâmetros comuns. Destacam-se os sistemas Rock Mass Rating (RMR), Sistema Q, o Geological Strength Index (GSI) e o Rock Mass Index (RMI) pela ampla aplicação e aceitação da comunidade técnica.

A partir desses sistemas de classificação, torna-se possível sistematizar o grupo de características que se objetiva analisar em um determinado maciço. Além

disso, reduz-se a dependência em testes de laboratório para determinados tipos de estudo, já que amostras representam uma porção extremamente limitada do todo e facilitam o aparecimento de resultados tendenciosos.

A presente pesquisa utilizou os sistemas RMR e GSI, logo uma abordagem teórica sobre esses sistemas será apresentada.

4.2.1. Rock Mass Rating (RMR)

O RMR, *Rock Mass Rating*, foi desenvolvido por Bieniawski entre os anos de 1972 e 1973 (BIENIAWSKI, 1989). De acordo com FREITAS (2011), a classificação de Bieniawski ou sistema RMR leva em conta seis parâmetros geomecânicos principais: Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta, grau de fraturamento do maciço através de RQD, espaçamento de descontinuidades, condições das descontinuidades, condições de fluxo e orientação das descontinuidades. Cada parâmetro adiciona valores que são somados e definem um índice variável entre 0 e 100, denominado de RMR. Para se realizar a aplicação desse método de classificação, o maciço rochoso precisará ser dividido em porções uniformes, e cada seção deverá ser classificada de forma individual. A Tabela 1 apresenta os parâmetros de classificação do sistema RMR.

Tabela 1 - Rock Mass Rating.

Parâmetros		Valores							
1	Resistência da rocha intacta	Compressão o puntiforme	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Ver compressão uniaxial		
		Compressão o uniaxial	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5 - 25 MPa	1 - 5 MPa	<1 MPa
	Pesos (P1)	15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD	90-100%	75-90%	50-75%	25-50%	<25%			
	Pesos (P2)	20	17	13	8	3			
3	Espaçamento das descontinuidades	>2m	0,6-2m	200-600mm	60-200mm	<60mm			
	Pesos (P3)	20	15	10	8	5			
4	Condição das descontinuidades	Superfícies muito rugosas, sem abertura, paredes de	Superfícies ligeiramente rugosas, abertura <1mm paredes	Superfícies ligeiramente rugosas, abertura <1mm,	Superfície polidas ou preenchimento com espessura <5mm ou juntas	Preenchimento mole com espessura >5mm ou juntas contínuas com abertura >5mm			

		rocha não alteradas	ligeiramente alteradas	paredes muito alteradas	contínuas com abertura 1-5mm		
	Pesos (P4)	30	25	20	10	0	
5	Presença de água	Influxo por 10m no comprimento do túnel (1/m)	Nenhum	< 10 L/min	10-25 L/min	25-125 L/min	> 125 L/min
		pressão de água na junta/σ principal maior (relação)	0	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	> 0,5
		Condições gerais	Completamente seco	Água intersticial	Úmido	Gotejamento	Fluxo
	Pesos (P5)	15	10	7	4	0	

Fonte: BIENIAWSKI (1989).

Para uma análise mais profunda em relação ao parâmetro condições das descontinuidades a Tabela 2 deve ser utilizada. Na Tabela 2 as características das descontinuidades são tratadas separadamente, e o somatório dos pesos individuais substituem o parâmetro 4 da Tabela 1.

Tabela 2 - Determinação do peso do parâmetro condições das descontinuidades.

Parâmetro	Valor				
Persistência	1m	1m-3m	3m-10m	10m-20m	>20m
	6	4	2	1	0
Abertura	Nenhuma	<0,1mm	0,1mm– 1,0mm	1mm – 5mm	>5mm
	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito rugosa	rugosa	Ligeiramente rugosa	Lisa	Estriada
	6	5	3	1	0
Preenchimento		Preenchimento duro		Preenchimento macio	
	Nenhum	<5mm	>5mm	<5mm	>5mm
	6	4	2	2	0
Alteração	Não alterada	Ligeiramente alterada	Moderadamente alterada	Muito alterada	Decomposta
	6	5	3	1	0
Valor (P4)	Somatório das pontuações				

Fonte: BIENIAWSKI (1989).

Para a obtenção do RMR global é necessário incluir o sexto parâmetro no RMR básico, relativo à orientação das descontinuidades. Importante salientar que a influência das orientações das descontinuidades depende das aplicações do projeto em análise, tais como taludes urbanos, mineração, escavações subterrâneas e fundações. Assim, têm-se a relatividade do sexto parâmetro. A Tabela 3 apresenta as características para determinação das classes de orientação. A Tabela 4 apresenta o peso relativo ao sexto parâmetro.

Tabela 3 - Classes de orientação das descontinuidades em escavações de túneis.

Direção perpendicular ao eixo do túnel			
Na direção do mergulho		Contra o mergulho	
45 – 90°	20 – 45°	45 – 90°	20 – 45°
Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável
Direção paralela ao eixo do túnel		Independentemente da direção (strike)	
20 – 45°	45 – 90°	0 – 20°	
Razoável	Muito desfavorável	Razoável	

Fonte: Modificado de BIENIAWSKI, (1989).

Tabela 4 - Pesos para correção do RMR básico.

Orientações da direção e mergulho		Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável
Valor	Túneis e Minas	0	-2	-5	-10	-12
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	

Fonte: Modificado de BIENIAWSKI (1989).

A classificação do maciço rochoso pelo RMR de acordo com BIENIAWSKI (1989) está apresentada na Tabela 5. Neste sistema de classificação o maciço rochoso é dividido em cinco classes, maciço muito bom, bom, razoável, pobre e muito pobre.

Tabela 5 - Classificação do maciço rochoso pelo RMR.

Classificação do maciço rochoso de acordo com o RMR					
Valor	100-81	80-61	60-41	40-21	< 21
Classe	I	II	III	IV	V
Descrição da rocha	Muito boa	Boa	Razoável	Pobre	Muito pobre

Fonte: BIENIAWSKI (1989).

Após a obtenção do valor de RMR, é possível identificar a qualidade do maciço rochoso, assim como a faixa de valores de coesão e ângulos de atrito estimados. A Tabela 6 apresenta as categorias de classificação de um maciço através do sistema RMR.

Tabela 6 - Classificação de maciços rochosos de acordo com o RMR.

Somatório dos pesos (fator RMR)	81-100	61-80	41-60	21-40	<20
Classes	I	II	III	IV	V
Qualidade do maciço	Muito bom	Bom	Razoável	Fraco	Muito fraco
Coesão da massa rochosa (kPa)	>400	300-400	200-300	100-200	<100
Ângulo de atrito da massa rochosa	>45	35<45	25<35	15<25	<15

Fonte: FREITAS (2011).

4.2.2. Geological Strength Index (GSI)

Proposto por HOEK (1994) e HOEK *et al.* (1995), o Geological Strength Index (GSI) tem como principal objetivo estimar a redução da resistência do maciço rochoso em diferentes condições geológicas (ÁVILA, 2012).

A partir do GSI é possível obter os critérios de resistência de Hoek-Brown. O GSI apresenta vantagem na determinação destes parâmetros devido às dificuldades de ordens técnicas e econômicas na determinação de parâmetros por meio de ensaios in situ. A Figura 2 apresenta uma forma de obtenção da classificação pelo GSI.

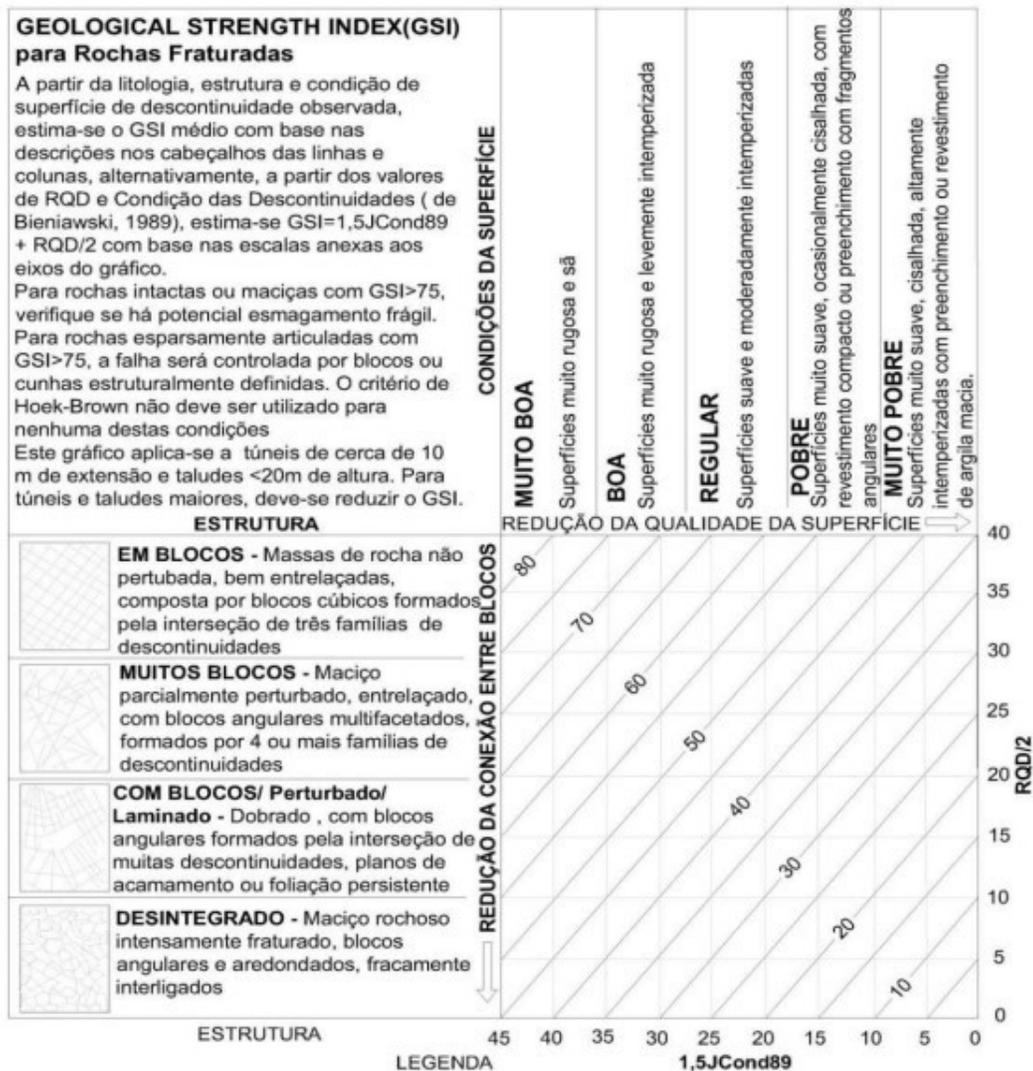


Figura 2 - Estimativa do GSI para maciços fraturados.

Fonte: CAMPOS (2018).

4.3. Efeito Escala

A presença de famílias de descontinuidades dentro de um maciço rochoso pode afetar diretamente a estabilidade dos taludes de uma mina, gerando influências diversas de acordo com suas características geomecânicas. Segundo SILVA (2015), é necessário que se defina a escala de observação das propriedades do maciço rochoso, pois o número de descontinuidades consideradas em um determinado intervalo interfere diretamente na análise de estabilidade nesse

trecho, influenciando no ângulo e altura seguros do talude. O efeito escala pode ser observado na Figura 3.



Figura 3 - Representação do efeito escala.

Fonte: SILVA (2015).

Quanto maior for a dimensão do talude em relação ao comprimento máximo das faces das descontinuidades, menos influência na estabilidade estas últimas terão sobre a região observada. Dessa forma, o talude terá uma resistência aproximada à resistência do maciço rochoso, e a região analisada poderá ser considerada um contínuo equivalente.

4.4. Estabilidade de Taludes Rochosos

Durante o estudo de estabilidade de um determinado talude de rocha é necessário que sejam levados em consideração diversos fatores influenciadores. Características que afetam diretamente as possibilidades de ruptura incluem: direção e mergulho da face do talude e famílias de descontinuidades, espaçamento entre fraturas, dimensão média dos blocos unitários, coesão, persistência e preenchimento das descontinuidades, peso específico da rocha, presença de água, sísmica dentre outros.

Para que um estudo de estabilidade seja bem realizado, é necessário que sejam utilizados diversos tipos de métodos de classificação, identificação e

interpretação de maciços e taludes rochosos, buscando englobar a maior quantidade possível de parâmetros geotécnicos.

4.4.1. Análise Cinemática

Os estudos cinemáticos aplicados a taludes rochosos buscam identificar o potencial de ocorrência dos diversos tipos de ruptura. Cada modo de ruptura pode ocorrer devido à presença de descontinuidades com mergulho e direção não favoráveis à estabilidade do maciço.

Um talude pode sofrer rupturas quando as diversas forças que atuam sobre ele não podem ser suportadas pela sua geometria e pela orientação, forma e tamanho dos blocos de rocha maciça que o compõem. A presença de descontinuidades no maciço rochoso pode servir de ponto de partida para sua ruptura, capaz de ocorrer em três modos principais em situações de baixo intemperismo: ruptura planar, em cunha e tombamento.

4.4.1.1. Ruptura Planar

Ruptura planar ocorre em situações nas quais as famílias de descontinuidades do maciço possuem mergulho predominantemente paralelo a direção da face do talude. Segundo SINGH (2011), a orientação das famílias pode possuir uma diferença de aproximadamente 15° em relação à atitude do talude.

Segundo SILVA (2015) é necessário, para que haja deslizamento, que as estruturas sejam aflorantes e possuam inclinação com ângulo maior que o ângulo de atrito interno da descontinuidade e menor que o mergulho da face livre do talude. A presença de outras famílias de descontinuidades em sentido aproximadamente perpendicular a face do talude também deve existir para que haja formação do bloco que sofre deslizamento.

Para que haja deslize, é necessário que o plano de escorregamento intercepte o topo do talude, ou seja, conectado através de uma fratura de tensão. Além

disso, WILLYE & MAH (2004) afirma que superfícies de alívio que oferecem resistência desprezível devem estar presentes nos limites laterais do bloco. As feições desse tipo de ruptura podem ser observadas na Figura 4 e Figura 5.

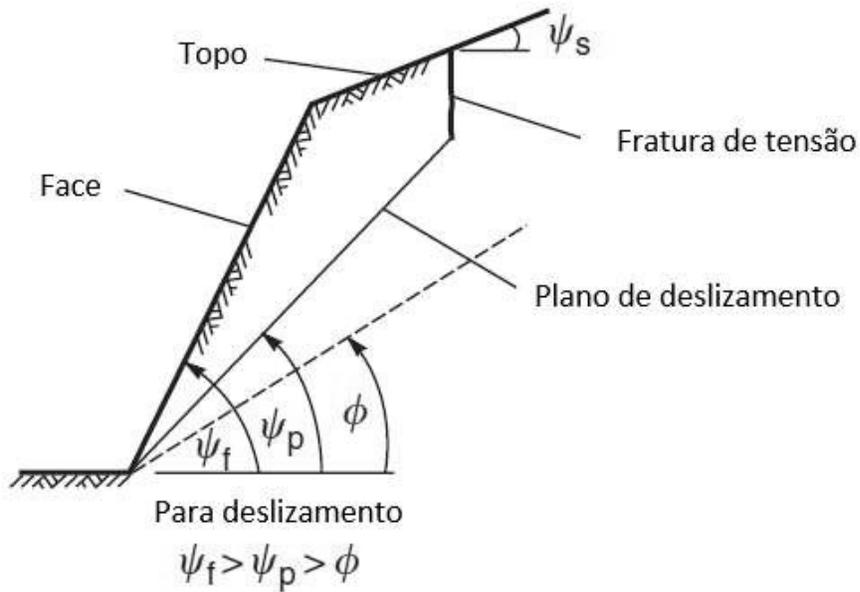


Figura 4 - Seção longitudinal demonstrando a geometria do talude e planos formando uma ruptura planar.

Fonte: Adaptado de WILLYE & MAH (2004).

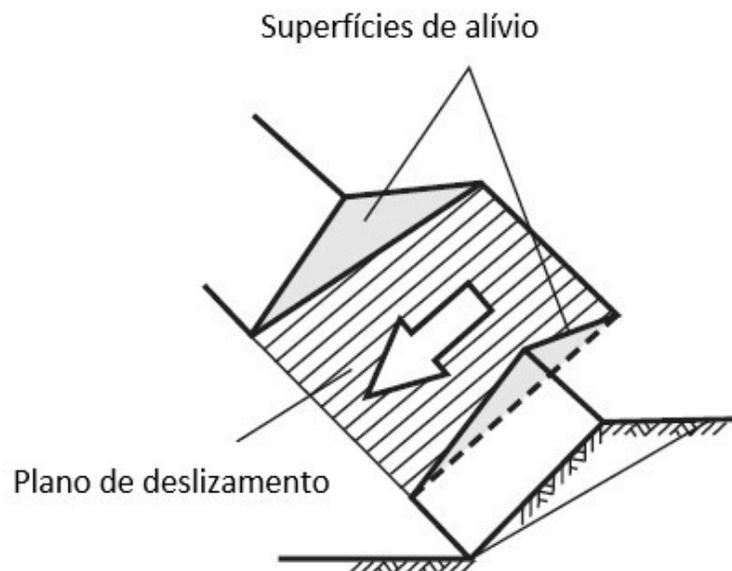


Figura 5 - Superfícies de alívio em cada extremidade de uma ruptura planar.

Fonte: Adaptado de WILLYE & MAH (2004).

Na Figura 4, Ψ_s corresponde ao ângulo da face superior do talude, Ψ_f representa o ângulo de mergulho do talude, Ψ_p indica o ângulo de mergulho do plano de ruptura, e Φ condiz com o ângulo de atrito.

Uma possível ruptura do tipo planar pode ser identificada através de uma análise cinemática por projeções estereográficas. A zona crítica para ruptura planar é definida pela interseção entre as representações gráficas dos limites laterais, o cone manifestado pelo ângulo de atrito, e o envoltório gerado pela projeção dos possíveis planos capazes de aflorar no talude. Essa região delimita o setor onde todos os polos de descontinuidades contidos em seu interior apresentam risco de ruptura. Um modelo de exemplo da ruptura planar pode ser observado na Figura 6.

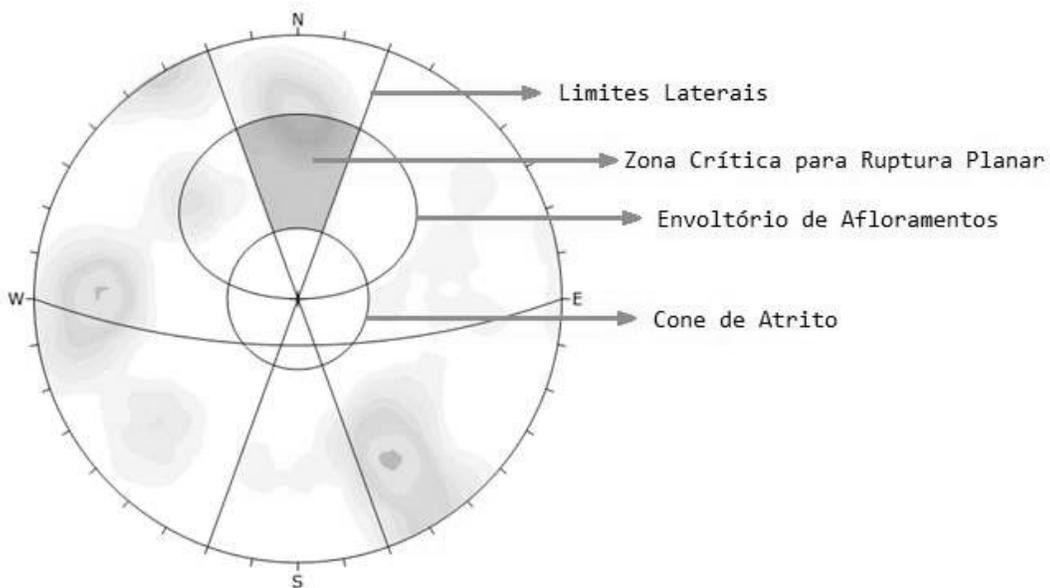


Figura 6 - Representação estereográfica de uma análise cinemática de ruptura planar.

4.4.1.2. Ruptura em cunha

Ocorrida a partir da convergência de dois grupos distintos de descontinuidades dentro do maciço rochoso, a ruptura em cunha acontece mais frequentemente

do que a planar devido, segundo WILLYE & MAH (2004), à grande variedade de condições geológicas e geométricas que permitem seu acontecimento.

Nesse modo de ruptura, dois planos formados por famílias de descontinuidades se interceptam formando uma linha de interseção e delimitando a dimensão e forma geométrica do bloco sujeito a ruptura.

Para que haja deslizamento da cunha formada nesse tipo de ruptura, é necessário que a linha de interseção possua ângulo de mergulho inferior ao da face do talude e maior que a média do ângulo de atrito dos dois planos de deslizamento. A composição geométrica de uma ruptura em cunha pode ser observada na Figura 7 e Figura 8.

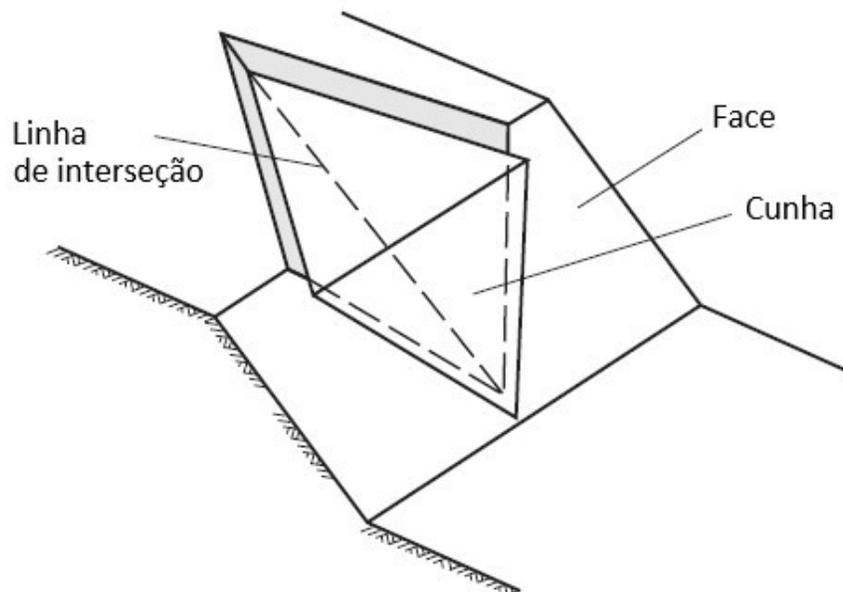


Figura 7 - Vista superior de uma ruptura em cunha, exemplificando sua geometria.

Fonte: Adaptado de WILLYE & MAH (2004)

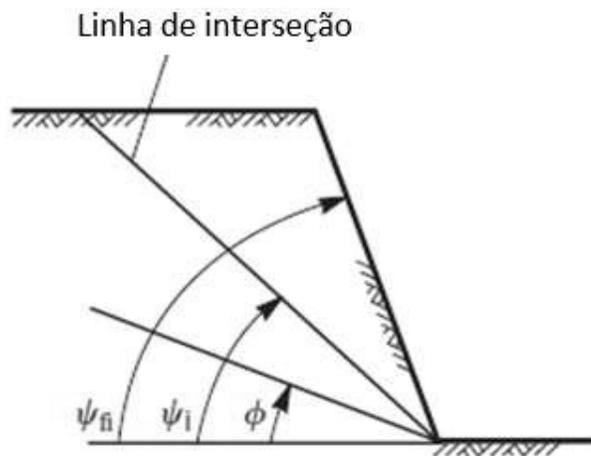


Figura 8 - Condições geométricas para uma ruptura em cunha, observadas através de uma seção longitudinal e correlacionando ângulos à linha de interseção.

Fonte: Adaptado de WILLYE & MAH (2004)

Na Figura 8, ψ_a indica o ângulo de mergulho do talude, ψ_i corresponde ao mergulho da linha de interseção entre os dois planos, e ϕ representa o ângulo de atrito.

É possível identificar a presença de rupturas em cunha através de projeções estereográficas em análises cinemáticas. Diferentemente da análise cinemática dos outros tipos de ruptura, que levam em conta a posição dos polos em um estereograma, será as interseções entre as descontinuidades, contidas dentro das zonas críticas, que indicarão possibilidade de ruptura. A zona crítica primária indica cunhas que satisfazem condições cinemáticas e de atrito para ruptura. Já a zona crítica secundária engloba interseções que possuem ângulo de mergulho inferior ao de atrito, porém ainda apresentam possibilidade de ruptura em planos de descontinuidades isolados que apresentam um vetor de mergulho superior ao ângulo de atrito. A área é delimitada pela representação gráfica do mergulho da face do talude e pelo cone formado pelo ângulo de atrito. É possível observar um modelo de exemplo da ruptura em cunha na Figura 9.

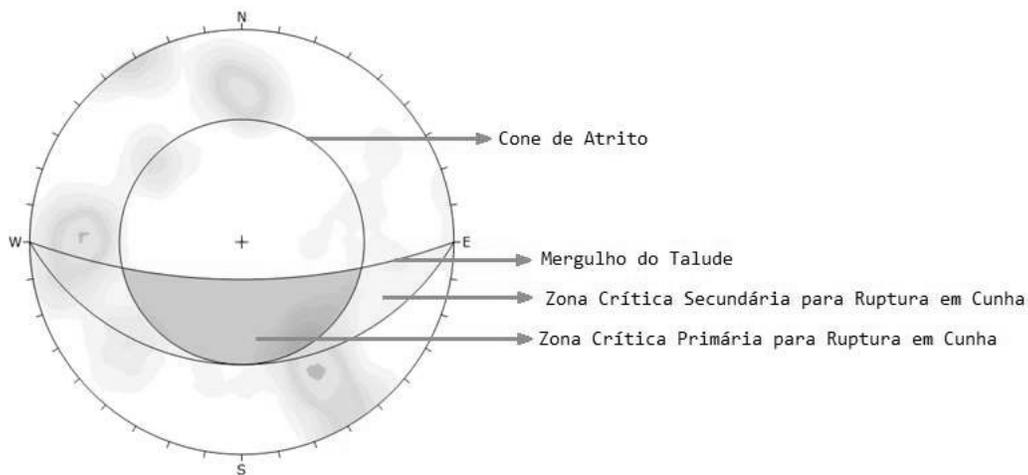


Figura 9 - Representação estereográfica de uma análise cinemática de ruptura em cunha.

4.4.1.3. Ruptura por Tombamento

Diferentemente das formas de ruptura descritas anteriormente, o tombamento de blocos consiste, de acordo com WILLYE & MAH (2004), na rotação de blocos de rocha ou colunas sobre uma base fixa. Para que ocorra ruptura por tombamento, é necessário que o ângulo de mergulho das famílias de discontinuidades seja maior que a inclinação do talude e possuam maior profundidade que sua face. Segundo SINGH (2011), intemperismo e degradação podem provocar alívio de massas rochosas e acúmulo de sedimentos na superfície, o que contribui ainda mais para redução da estabilidade dos blocos que compõem o talude

À medida que ocorrem os tombamentos das porções de rocha frontais, inicia-se uma sequência de quedas dos blocos de rochas em regiões mais recuadas do talude e de maior altura. Isso ocorre pois os centros de massa se encontram deslocados para fora da estrutura do talude e os apoios, constituídos pelos blocos menores que cederam, deixaram de existir. Os estágios desse tipo de ruptura podem ser observados na Figura 10.

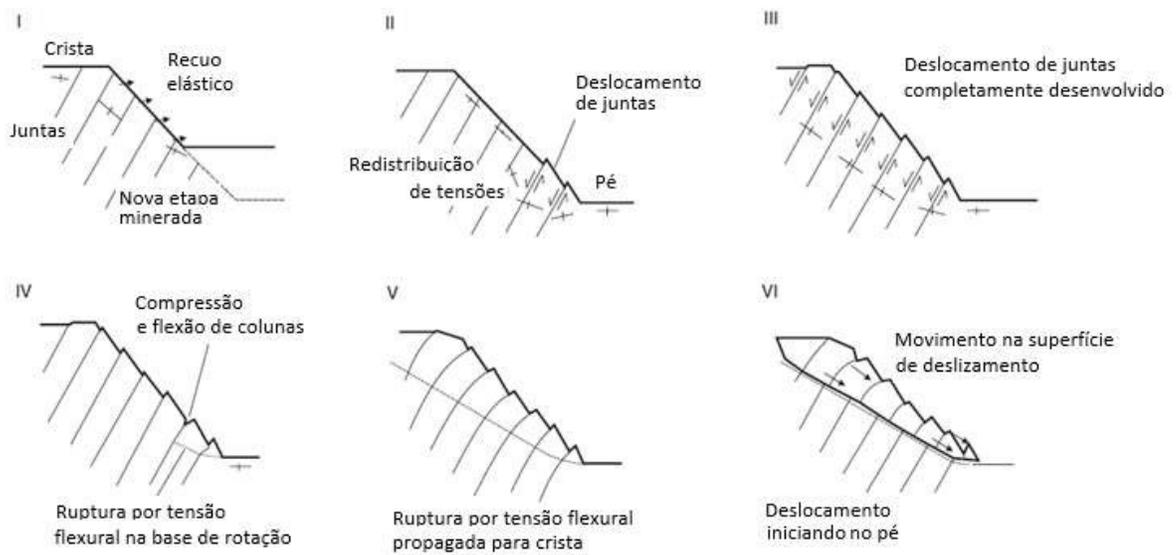


Figura 10 - Estágios de ruptura por tombamento de larga escala em talude.

Fonte: Adaptado de WILLYE & MAH (2004).

Assim como os outros tipos de ruptura, uma análise cinemática através de projeções estereográficas pode ser utilizada para se identificar possíveis casos de ruptura por tombamento. Polos contidos dentro da zona crítica, definida pelo plano limite de deslizamento e limites laterais, indicam a presença de descontinuidades que contribuem para que haja ruptura por tombamento em um determinado talude. Um exemplo da ruptura por tombamento pode ser observado na Figura 11.

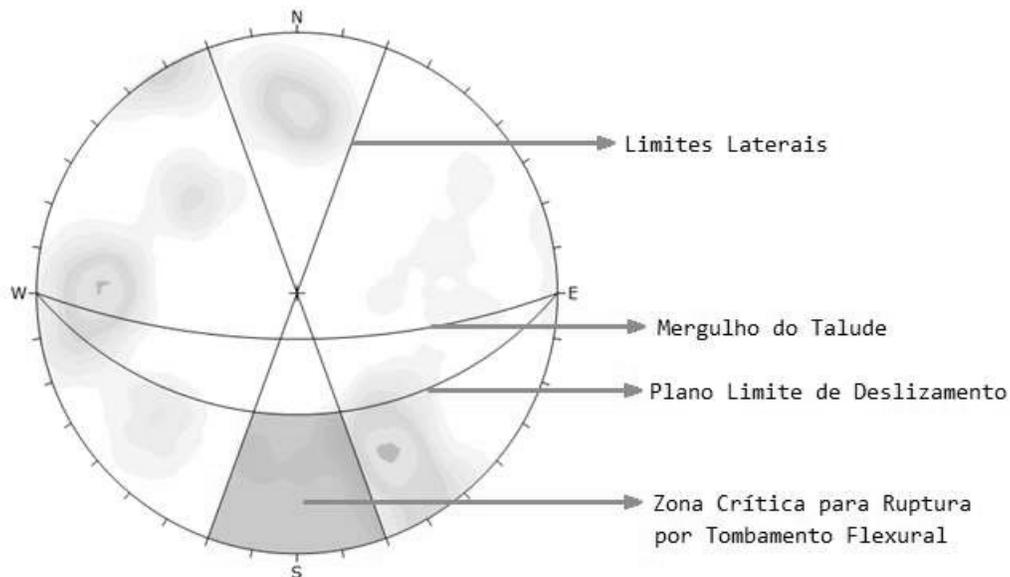


Figura 11 - Representação estereográfica de uma análise cinemática de ruptura por tombamento flexural.

4.4.2. Critérios de resistência

Buscando representar o comportamento de uma rocha durante seu processo de rompimento, os critérios de resistência utilizam de modelos matemáticos e gráficos para descrever de forma sistemática todas as etapas de ruptura. Dentre os inúmeros conhecidos, os critérios de resistência de Mohr-Coulomb e Hoek-Brown estão dentre os mais utilizados.

4.4.2.1. Critério de resistência de Mohr-Coulomb

Definido como um grupo de equações lineares, o critério de ruptura de Mohr-Coulomb é, segundo LABUZ & ZANG (2012), utilizado para descrever as condições nas quais um material isotrópico se rompe sob tensão.

O atrito gerado pela superfície da fratura através de sua composição mineral, rugosidade, tamanho e forma dos grãos, gera uma força contrária ao movimento de deslizamento de blocos no sentido da descontinuidade. Quanto maior o

ângulo de atrito de uma superfície, maior é a resistência à cisalhamento da descontinuidade, fazendo com que blocos devam possuir inclinações cada vez mais elevadas para vencer a força de atrito exercida contra seu peso para se deslocar em sentido descendente. Como apresentado por WILLYE & MAH (2004), uma descontinuidade planar sem preenchimento de material possui uma resistência ao cisalhamento dependente apenas do ângulo de atrito, já que a coesão será zero. A equação geral de uma reta relacionada ao critério de resistência proposta por Coulomb é:

$$\tau = S_0 + \sigma \tan \Phi$$

Em que τ representa as tensões cisalhantes atuando em um plano, S_0 corresponde ao valor de coesão, σ indica as tensões normais presentes e Φ é equivalente ao ângulo de atrito do material.

4.4.2.2. Critério de resistência de Hoek-Brown

Segundo WILLYE & MAH (2004), como alternativa para análise de resistência de rochas fraturadas, um método empírico foi desenvolvido por Hoek e Brown (1980) em que a resistência ao cisalhamento é representada como um envoltório de resistência curvado. Além disso, foram introduzidos os conceitos de maciços rochosos perturbados e não perturbados, e também um critério modificado para forçar o valor de resistência à zero para maciços rochosos de qualidade pobre. Dessa forma, Hoek e Brown desenvolveram a seguinte equação objetivando descrever de forma precisa a resistência de rochas isotrópicas:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^{0,5}$$

Em que, de acordo com WILLYE & MAH (2004), σ_1 e σ_3 são respectivamente a maior e menor tensão efetiva de ruptura, σ_{ci} é a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta, e m e s são constantes do material, sendo $s = 1$ para rocha intacta.

Ainda segundo WILLYE & MAH (2004), Hoek também introduziu o conceito de critério de Hoek-Brown generalizado, em que a forma do gráfico principal de tensão poderia ser ajustada através de um coeficiente variável a . O critério é expresso através da maior e menor tensões principais e apresenta a seguinte modificação da equação original:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

Em que m_b é um valor reduzido da constante experimental do material m_i , para rocha intacta, e é obtido da seguinte forma:

$$m_b = m_i \exp \left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right)$$

Da mesma forma, s e a são constantes da rocha obtidas através das equações:

$$s = \exp \left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right)$$

O fator D é dependente do grau de perturbação a que a rocha foi submetida após seu desmonte e o subsequente relaxamento de tensões. Pode variar de 0 para rochas não perturbada *in situ* até um valor de 1, para rochas extremamente perturbadas (WILLYE & MAH, 2004).

4.4.3. Análise de estabilidade determinística

A análise determinística da estabilidade de taludes clássica consiste na utilização de valores de fator de segurança para se determinar o nível de estabilidade de um determinado talude. Segundo ABRAMSON *et al.* (2002), deve-se levar em consideração incertezas associadas a parâmetros de solo e rocha, estratigrafia e consequências em situação de ruptura.

Este tipo de análise é aplicável a taludes rochosos de pequeno porte onde as descontinuidades delimitam blocos instáveis. Rupturas de blocos rochosos isolados não envolvem deformação significativa e a análise da estabilidade desses blocos pode ser feita através de métodos de equilíbrio-limite.

Nesses métodos é obtido o fator de segurança, índice muito utilizado na rotina de engenharia para avaliação de potenciais rupturas em taludes. O estado de carregamento envolve a força peso do bloco, poropressões nas descontinuidades, efeitos sísmicos, eventuais forças externas e cargas aplicadas por suportes.

O fator de segurança é calculado através da relação entre a capacidade de carga do maciço (forças disponíveis) e o carregamento solicitado (forças mobilizadas). O índice pode ser representado através da equação:

$$F = \frac{\text{Forças resistentes disponíveis}}{\text{Forças resistentes mobilizadas}}$$

Quando a ruptura pode ocorrer segundo um plano, calcula-se o fator de segurança utilizando a equação:

$$F = \frac{cA + \sum n \tan \Phi}{\sum s}$$

Considerando-se a linha de interseção entre dois planos, a equação passa a ser:

$$F = \frac{c_1A_1 + \sum n_1 \tan \Phi_1 + c_2A_2 + \sum n_2 \tan \Phi_2}{s_{12}}$$

Sendo o parâmetro c corresponde à coesão, A representante da área, e Φ_2 indicador da coesão em cada plano n .

A Figura 12 demonstra a atuação das forças sobre um determinado talude, assim como todos os parâmetros que influenciam na determinação do índice de fator de segurança, incluindo a presença de tirantes e sísmica localizada.

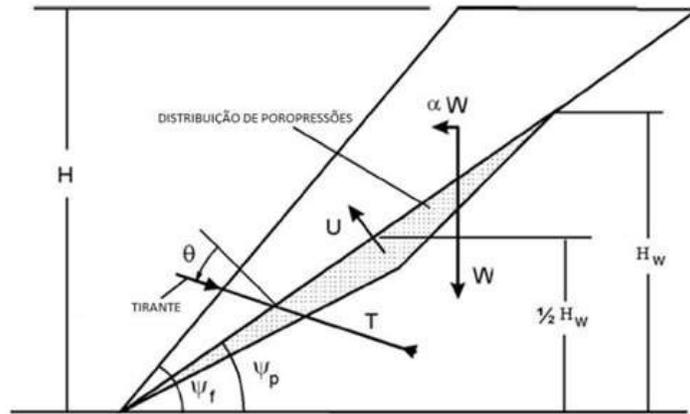


Figura 12 – Esquema de distribuição de forças em um talude.

A equação de fator de segurança correlacionando todos os parâmetros que afetam a estabilidade de um talude é descrita como:

$$F = \frac{cA + (W(\cos\Psi_p - \alpha\text{sen}\Psi_p) - U + T\cos) \tan\Phi}{W(\text{sen}\Psi_p + \alpha\cos\Psi_p) - T\text{sen}\Phi}$$

Sendo W a força peso do bloco formado, U a força da água atuando no plano de deslizamento, A a área da superfície deslizante e Ψ_p seu mergulho, e T a tensão sobre os tirantes de sustentação.

Valores de fator de segurança maiores de 1 são considerados seguros pela metodologia, porém normalmente são utilizados valores acima de 1,3, definidos pela NBR 11.682. Dessa forma, obtêm-se uma margem de maior segurança em consideração ao grande número de variáveis que não podem ser contabilizadas com precisão durante o cálculo.

O fato de a análise determinística ser altamente influenciada por variáveis indeterminadas torna esse método não tão representativo para áreas com alto grau de incerteza, sendo recomendado o uso de métodos probabilísticos em adição aos determinísticos.

4.5. Considerações sobre o trabalho de ÁVILA (2012)

O trabalho realizado por ÁVILA (2012) objetivou a caracterização geomecânica de maciços rochosos, buscando compará-los e observar sua aplicabilidade no

estudo das propriedades dos maciços. Foram estudados dois taludes: um composto por gnaisses, e outro por filitos, este último sendo o objeto de estudo deste trabalho.

A porção experimental da obra foi dividida em 8 etapas: Observação, definição e caracterização das famílias de descontinuidades contidas no talude; realização de análise cinemática; cálculo da resistência à compressão da rocha através do teste com esclerômetro de Schmidt; cálculo do RQD; aplicação da classificação geomecânica RMR; aplicação do sistema Q; aplicação da classificação GSI e aplicação da classificação RMI.

4.5.1. Resultados e Conclusões de ÁVILA (2012)

De acordo com ÁVILA (2012), não foi realizado o teste de compressão uniaxial (PLT) para o filito estudado, pois a rocha possuía resistência à compressão menor que 25 MPa. Esse valor a classifica como rocha branda, que segundo a literatura estudada por ÁVILA (2012), não é adequada para ser avaliada por esse tipo de teste. O valor médio corrigido encontrado após a realização do teste com o esclerômetro de Schmidt foi aproximadamente de 14 MPa.

ÁVILA (2012) realizou também a estimativa do valor de deformação (E_m), utilizando-se das equações do Sistema-Q, RMI, e RMR, encontrando valores de 4,52 GPa, 4,4 GPa, e 9 GPa respectivamente. Os resultados obtidos permitiram a ÁVILA a (2012) inferir que a última equação não deve ser usada para o cálculo realizado, devido à grande divergência com relação aos valores obtidos após o cálculo utilizando as outras duas metodologias.

Foi observada, a partir das três classificações utilizadas, que as famílias de descontinuidades denominadas por ÁVILA (2012) como 1 e 2 são as principais responsáveis pela redução na resistência do maciço rochoso. Além disso, notas piores foram obtidas para a Família 1 através das classificações RMR e RMI já que, segundo ÁVILA (2012), essa é a família de descontinuidades principal da rocha e conseqüentemente é a que mais influencia na diminuição de resistência

do maciço rochoso. O resumo dos resultados de classificação obtidos por ÁVILA (2012) está disposto na Tabela 7.

Tabela 7 - Resumo dos resultados obtidos na classificação de cada família de descontinuidade no sistema RMR.

Família	Nota	Classe
1	39	IV
2	49	III
3	56	III
Média	48	III

Fonte: ÁVILA (2012).

5. METODOLOGIA

5.1. Descrição do talude estudado

Compondo o Grupo Sabará, posicionado estratigraficamente no topo do Grupo Piracicaba, o afloramento de filito CAS-02 possui características típicas da unidade a que pertence incluindo, segundo ÁVILA (2012), veios de quartzo de dimensões centimétricas e comportamento concordante à direção das camadas, além de possuir camadas de pouca espessura apresentando concordância à foliação.

O filito CAS-02 é constituído também, de acordo com ÁVILA (2012), de metassedimentos de moderada alteração, detentores de coloração que varia em um espectro de rosa à bege e granulometria entre areia fina e argila. O grupo em que o maciço se encontra é, como afirmado por ALMEIDA *et al.* (2005), a unidade de idade paleoproterozóica do Quadrilátero Ferrífero e é constituída por sedimentos fundamentalmente terrígenos.

O talude a ser analisado neste trabalho é localizado no bairro São Bento, em Belo Horizonte, próximo à rua Inspetor José Aparecido. Segundo ÁVILA (2012), os dados foram coletados através de amostragens realizadas em uma janela delimitada próxima ao centro do afloramento, medindo 30 metros de extensão e

considerando a altura do talude constante de 15 metros. A Figura 13 mostra a face do talude que compõe o filito (CAS-02).



Figura 13 - Vista da face do talude composto pelo maciço de filito, CAS-02.

Fonte: ÁVILA (2012).

5.2. Métodos aplicados

Este trabalho consistiu em essencialmente três etapas: estudo e tratamento em software dos dados levantados por ÁVILA (2012), além de elaboração de modelos tridimensionais representando descontinuidades e geometria do talude; testes de estabilidade para cada tipo de ruptura e, por fim, análise e interpretação dos resultados obtidos.

Em relação aos materiais utilizados, destacam-se os softwares que foram todos da Rocscience, especificamente o Dips para análise estrutural e análise

cinemática, o RocPlane para análise de ruptura planar e o Swedge para análise de ruptura em cunha.

A primeira parte foi baseada nos dados de levantamento das descontinuidades do maciço rochoso composto por filitos CAS-02, obtidos por ÁVILA (2012). As atitudes de cada descontinuidade foram adicionadas ao software Dips para a visualização de seus arranjos estruturais dentro do maciço rochoso através da representação de cada descontinuidade. A partir daí a análise cinemática foi aplicada e identificou-se os tipos de ruptura. Os parâmetros para a análise cinemática estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Resumo dos parâmetros considerados na análise cinemática.

Atitude do talude	80/285		
Ângulo de atrito	25°		
Limite lateral	20°		
Atitude média das Famílias	Família 1	Família 2	Família 3
	76/318	26/280	88/222

A análise cinemática identificou os tipos de rupturas para o maciço em estudo, permitindo assim o estudo de estabilidade nos softwares específicos. Foram utilizados o RocPlane para a análise de rupturas planares e o Swedge para a ruptura em cunha. As Tabelas 9 e Tabela 10 apresentam todos os parâmetros utilizados para a análise de ruptura planar e para a análise de ruptura em cunha.

Tabela 9 – Parâmetros considerados na análise para ruptura planar.

Ângulo de mergulho do talude	80°
Altura do talude	15 m
Ângulo de mergulho da descontinuidade (Família 2)	26°
Peso específico	1,45 t/m ³
Resistência à compressão uniaxial (UCS)	1428 t/m ²
Intact Rock Constant (mi)	7
Geological Strength Index (GSI)	45
Disturbance fator (D)	0,7

O peso específico considerado na Tabela 9 foi obtido a partir do valor de densidade do filito obtido por ÁVILA (2012), de 1,45 g/cm³. Da mesma forma, o valor de UCS utilizado foi alcançado a partir da conversão do valor médio σ_c de 14 MPa encontrado por ÁVILA (2012) em campo. O mi considerado neste trabalho é o do filito, igual a 7, enquanto o GSI utilizado foi o considerado por ÁVILA (2012), de 45. Acredita-se que o talude possa ter um valor de perturbação, devido a alívio de tensões que pode existir face do talude, não se sabe se foi aplicado algum desmonte, logo considerou-se um D médio igual a 0,7.

Tabela 10 - Parâmetros considerados na análise para ruptura em cunha.

Atitude do talude	80/285		
Altura do talude	15 m		
Peso Específico	1,45 t/m ³		
Coesão	Família 1	Família 2	Família 3
	10,197 t/m ²	20,39 t/m ²	20,39 t/m ²
Ângulo de atrito	Família 1	Família 2	Família 3
	15°	25°	25°

Como a Família 1 possui classe IV (pobre) pelo sistema RMR utilizado por ÁVILA (2012), considerou-se menores valores de coesão e ângulo de atrito para esta família que para as demais estudadas, que possuem classe III (razoável).

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. Reprodução da definição das famílias de acordo com ÁVILA (2012)

Os dados relativos à atitude de cada família de descontinuidades obtidos por ÁVILA (2012) foram tratados no programa Dips. Esse processo objetivou confirmar os valores correspondentes às médias entre as descontinuidades e obter uma nítida visualização do comportamento e risco de ruptura, considerando as interações entre as três famílias. Os valores de atitude de cada família podem ser encontrados na Tabela 11.

Tabela 11 - Resumo das medidas realizadas no maciço de filito.

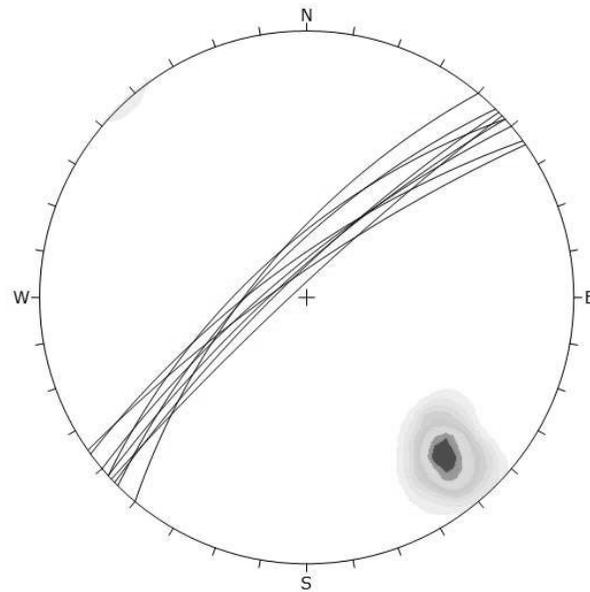
Atitude (dip direction/dip)	Família	Atitude (dip direction/dip)	Família	Atitude (dip direction/dip)	Família
310/69	1	272/35	2	221/90	3
315/71	1	320/28	2	223/85	3
318/68	1	348/20	2	222/88	Média F3
324/74	1	297/36	2		
325/80	1	241/45	2		
318/79	1	238/23	2		
316/80	1	292/05	2		
320/77	1	276/45	2		
317/85	1	285/29	Média F2		
318/76	Média F1				

Fonte: ÁVILA (2012).

A partir dos dados descritos na Tabela 1, os dados foram inseridos no Dips para determinação das atitudes médias.

6.1.1. Família 1

Os nove valores de atitude da Família 1 foram computados e dispostos de forma a permitir a visualização da posição dos polos e das projeções dos mergulhos e direções das descontinuidades, como é possível observar na Figura 14.



Color	Density Concentrations
	0.00 - 6.50
	6.50 - 13.00
	13.00 - 19.50
	19.50 - 26.00
	26.00 - 32.50
	32.50 - 39.00
	39.00 - 45.50
	45.50 - 52.00
	52.00 - 58.50
	58.50 - 65.00
Maximum Density	64.94%
Contour Data	Pole Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%
Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	9 (9 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Figura 14 - Polos e projeções das nove descontinuidades que compõem a Família 1.

Em seguida, obteve-se a média da atitude das descontinuidades, com o valor de 076/318, conforme encontrado por ÁVILA (2012). O parâmetro pode ser observado na Figura15.

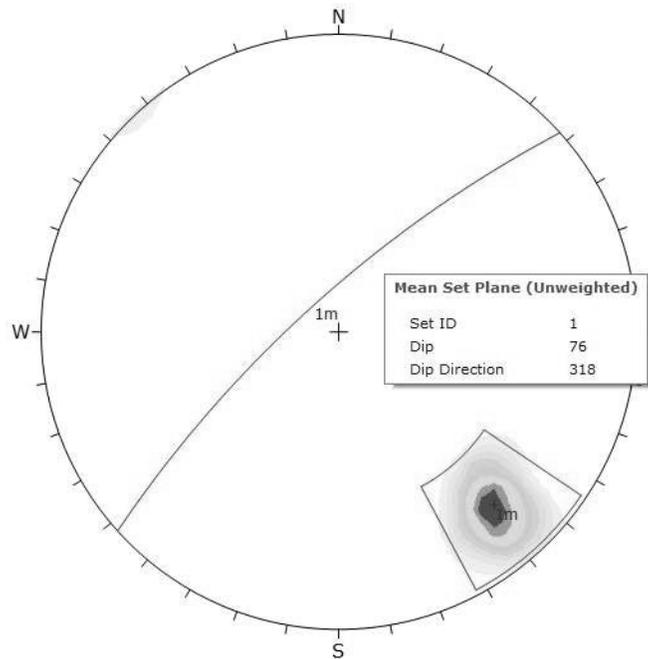
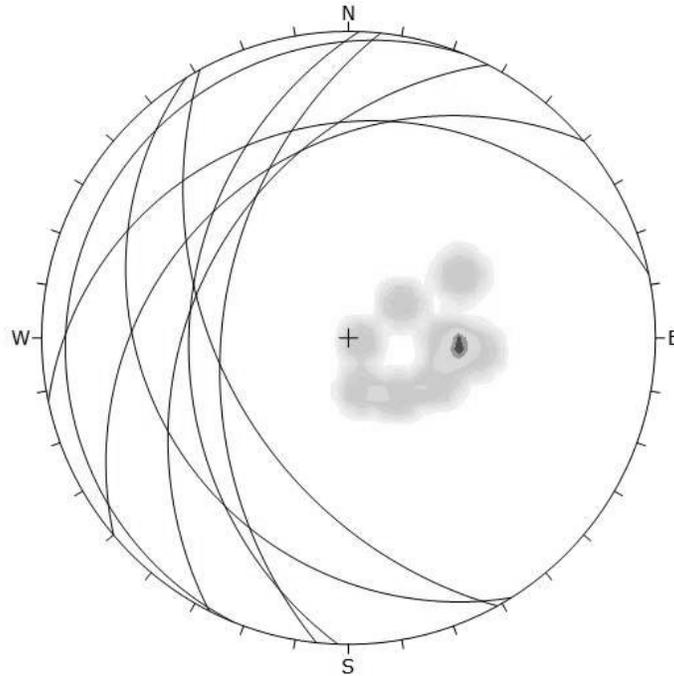


Figura15 - Média da atitude da Família 1.

6.1.2 Família 2

Todos os oito valores de atitude das descontinuidades que integram a Família 2 foram inseridos no programa Dips, originando a representação estereográfica dos polos das descontinuidades e a projeção da atitude de cada uma. O resultado pode ser observado na Figura 16.



Color	Density Concentrations
	0.00 - 2.20
	2.20 - 4.40
	4.40 - 6.60
	6.60 - 8.80
	8.80 - 11.00
	11.00 - 13.20
	13.20 - 15.40
	15.40 - 17.60
	17.60 - 19.80
	19.80 - 22.00
Maximum Density	21.78%
Contour Data	Pole Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%
Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	8 (8 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Figura 16 - Polos e projeções das oito descontinuidades que compõem a Família 2.

Considerando-se todos os polos pertencentes à Família 2, obteve-se a média da atitude das descontinuidades que a compõem. O valor de 026/280 encontrado neste trabalho possuiu leve diferença em relação ao de 029/285 obtido por ÁVILA (2012). A discrepância entre as médias de atitude obtidas foi atribuída à diferença de versões do software Dips utilizado pelos dois trabalhos, e devida a

seu pequeno valor, foi considerada insignificante para a realização deste estudo. O Valor obtido pode ser observado na Figura 17:

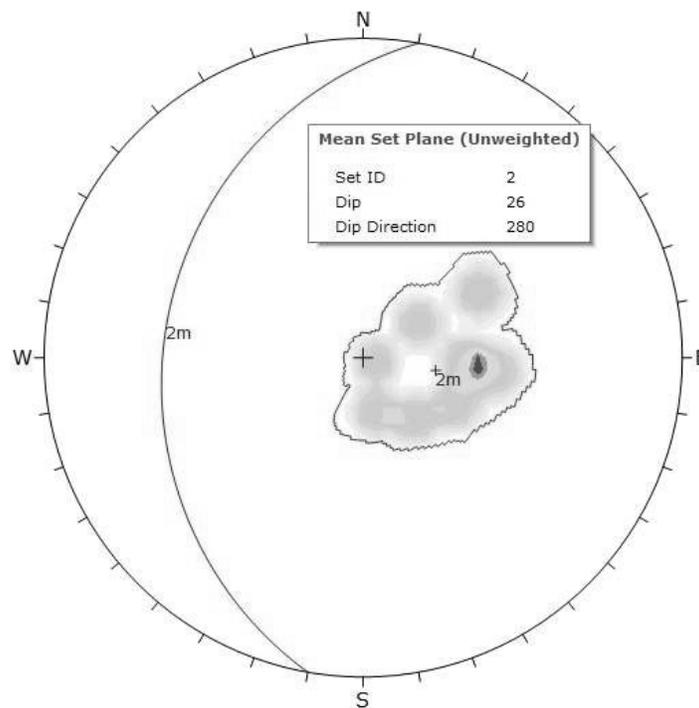
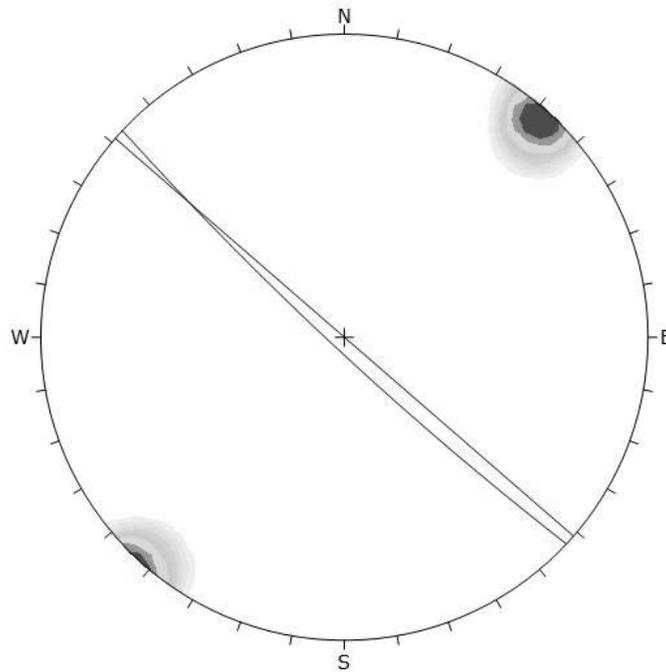


Figura 17 - Média da atitude da Família 2.

6.1.3. Família 3

Diferentemente das famílias anteriores, a Família 3 apresenta uma quantidade de apenas duas descontinuidades, além de possuir valores de atitude bastante distintos. Como esse grupo foi considerado por ÁVILA (2012) como relevante em relação a estabilidade do maciço mesmo sendo composto por poucas descontinuidades, decidiu-se por realizar seu estudo neste trabalho. Os valores de mergulho e direção da Família 3 foram computados, possibilitando a visualização do posicionamento dos polos e das projeções das atitudes das duas descontinuidades. O resultado é demonstrado na Figura 18.



Color	Density Concentrations
	0.00 - 9.80
	9.80 - 19.60
	19.60 - 29.40
	29.40 - 39.20
	39.20 - 49.00
	49.00 - 58.80
	58.80 - 68.60
	68.60 - 78.40
	78.40 - 88.20
	88.20 - 98.00
Maximum Density	97.13%
Contour Data	Pole Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%
Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	2 (2 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Figura 18 - Polos e projeções das duas descontinuidades que compõem a Família 3.

Assim como foi realizado com as famílias de descontinuidades anteriores, obteve-se a média da atitude da Família 3, sendo essa 087/222, conforme à obtida por ÁVILA (2012). Esse parâmetro pode ser observado na Figura 19.

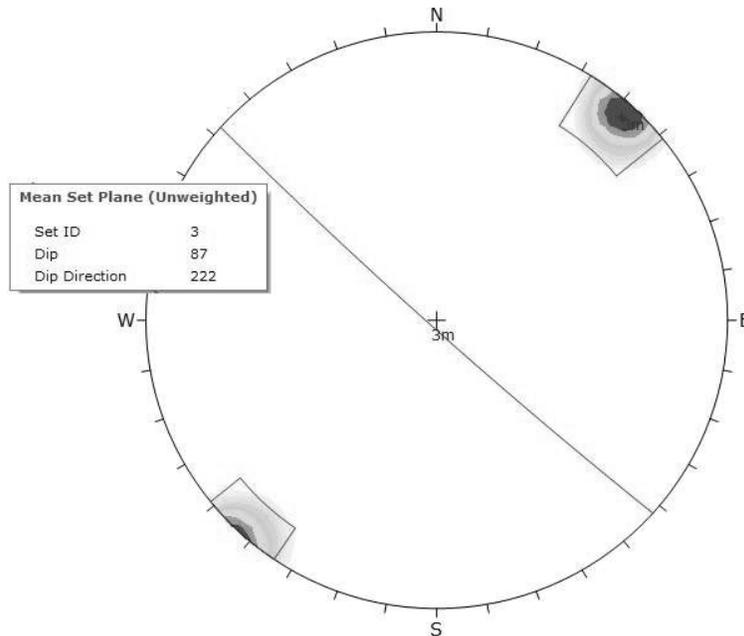


Figura 19 - Média da atitude da Família 3.

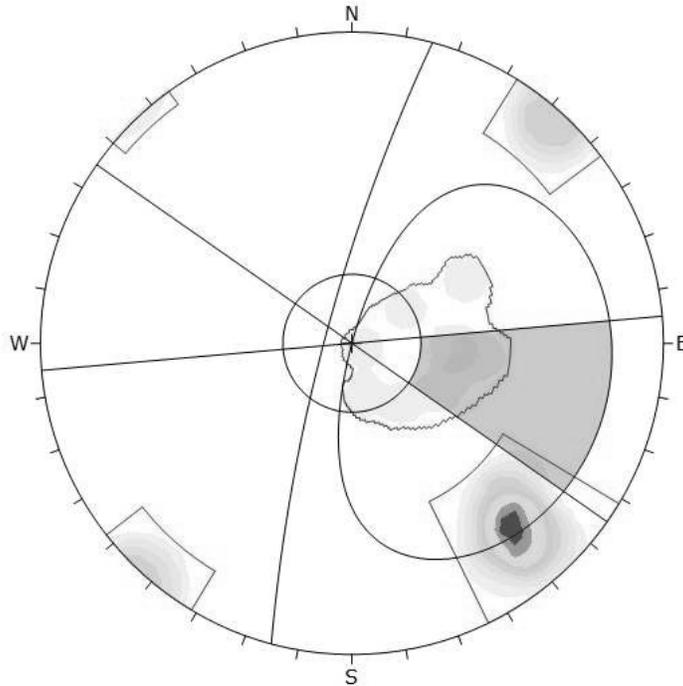
6.2 Reprodução da análise Cinemática de acordo com ÁVILA (2012)

ÁVILA (2012) realizou as análises cinemáticas para os tipos de ruptura, e estes resultados podem ser encontrados em sua dissertação de mestrado. Neste trabalho as análises foram reproduzidas, para que a análise de estabilidade ficasse completa. Por se tratar de um trabalho de conclusão de curso a reprodução foi interessante para que aluno pudesse aplicar todo o fluxo de um trabalho onde são identificadas as famílias de descontinuidade com seus possíveis mecanismos de ruptura e posterior análise de estabilidade.

Após a observação individual e obtenção das médias de atitude de cada família de descontinuidades, realizou-se a análise cinemática para ruptura planar, em cunha, tombamento direto e tombamento flexural, esta última, uma forma de ruptura bastante presente em taludes compostos por filitos. Para esse estudo, utilizou-se limites laterais padrões de 20° e ângulo de atrito igual ao valor mínimo do maciço rochoso obtido por ÁVILA (2012), que varia entre 25° e 35°, buscando-se realizar um estudo mais conservador. O valor de atitude do talude é 080/285.

6.2.1 Análise cinemática por ruptura planar

Observando a Figura 20, pode-se notar que dos 20 polos pertencentes às três famílias de descontinuidades, 3 deles se encontram dentro da zona crítica para ruptura planar, correspondendo a 15% do total de pontos avaliados. Todos os polos críticos são pertencentes a Família 2, sendo equivalentes a 37,5% dos 8 polos pertencentes a esse conjunto de descontinuidades. O teste foi realizado levando em consideração limites laterais.



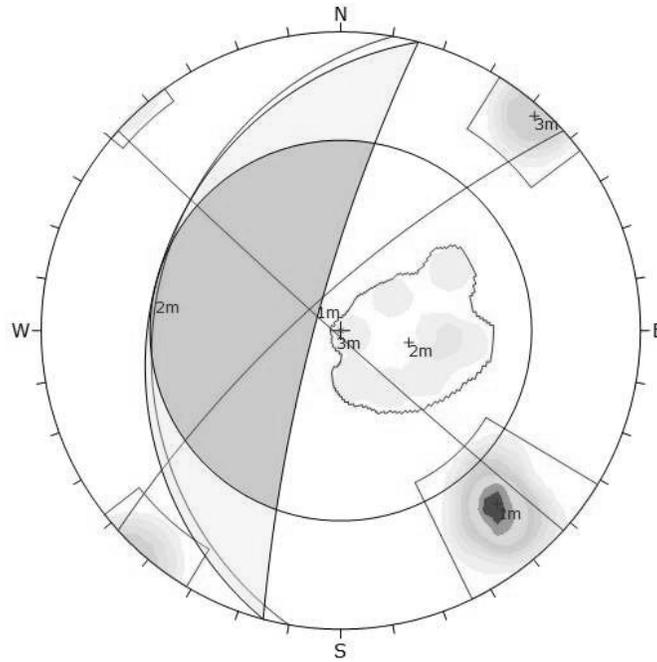
Color	Density Concentrations		
	0.00 - 3.00		
	3.00 - 6.00		
	6.00 - 9.00		
	9.00 - 12.00		
	12.00 - 15.00		
	15.00 - 18.00		
	18.00 - 21.00		
	21.00 - 24.00		
	24.00 - 27.00		
	27.00 - 30.00		
Maximum Density	29.22%		
Contour Data	Pole Vectors		
Contour Distribution	Fisher		
Counting Circle Size	1.0%		
Kinematic Analysis	Planar Sliding		
Slope Dip	80		
Slope Dip Direction	285		
Friction Angle	25°		
Lateral Limits	20°		
	Critical Total %		
Planar Sliding (All)	3	20	15.00%
Planar Sliding (Set 2)	3	8	37.50%
Plot Mode	Pole Vectors		
Vector Count	20 (20 Entries)		
Hemisphere	Lower		
Projection	Equal Angle		

Figura 20 - Análise cinemática para ruptura planar envolvendo as três famílias de descontinuidades.

Posto isso, fica evidente a formação de blocos capazes de sofrer ruptura planar no maciço em estudo.

6.2.2 Análise cinemática para ruptura em cunha

A Figura 21 demonstra os resultados obtidos após a realização da análise para ruptura em cunha. É possível observar a presença de três interseções localizadas no interior das zonas críticas para formação de cunhas capazes de sofrer ruptura, sendo essas formadas pelo encontro entre os planos médios das famílias 1 e 3; 1 e 2; 2 e 3.



Color	Density Concentrations			
	0.00	- 3.00		
	3.00	- 6.00		
	6.00	- 9.00		
	9.00	- 12.00		
	12.00	- 15.00		
	15.00	- 18.00		
	18.00	- 21.00		
	21.00	- 24.00		
	24.00	- 27.00		
	27.00	- 30.00		
Maximum Density		29.22%		
Contour Data		Pole Vectors		
Contour Distribution		Fisher		
Counting Circle Size		1.0%		
Kinematic Analysis		Wedge Sliding		
Slope Dip		80		
Slope Dip Direction		285		
Friction Angle		25°		
		Critical	Total	%
Wedge Sliding		105	190	55.26%
	Color	Dip	Dip Direction	Label
Mean Set Planes				
1m		76	318	
2m		26	280	
3m		88	222	
Plot Mode		Pole Vectors		
Vector Count		20 (20 Entries)		
Hemisphere		Lower		
Projection		Equal Angle		

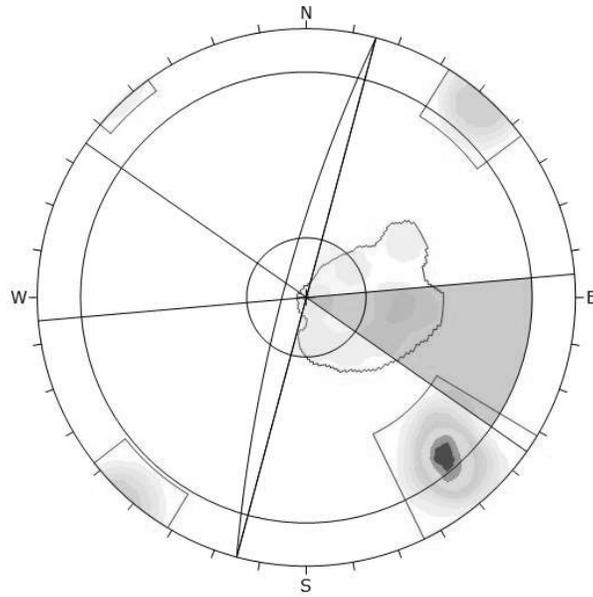
Figura 21 - Análise cinemática para ruptura em cunha envolvendo as três famílias de descontinuidades.

Pela Figura 21, percebe-se que todas as interseções estão se encaminhando para os limites fora da zona, com destaque para a interseção da família 3 e 2 encontrando-se no limite da zona para ruptura em cunha, o que pode impactar na formação do bloco.

Das 190 interseções formadas entre as 20 descontinuidades pertencentes às três famílias estudadas, 105 (55,26%) se encontram dentro das zonas críticas para ruptura. A interseção formada entre as famílias 1 e 2, assim como a gerada entre as famílias 2 e 3 indicam formação de bloco confinado.

6.2.3. Análise cinemática para ruptura por tombamento direto

Observa-se na Figura 22 que 6 dos 20 polos (30%) relacionados às 3 famílias de descontinuidades se encontram na zona crítica para formação de blocos capazes de sofrer tombamento direto. Além disso, nota-se que a família 2 é a responsável por todos os polos críticos encontrados no teste, sendo estes correspondentes a 75% dos 8 polos que a compõem.



Symbol	Feature
□	Critical Intersection

Color	Density Concentrations
	0.00 - 3.00
	3.00 - 6.00
	6.00 - 9.00
	9.00 - 12.00
	12.00 - 15.00
	15.00 - 18.00
	18.00 - 21.00
	21.00 - 24.00
	24.00 - 27.00
	27.00 - 30.00
Maximum Density	29.22%
Contour Data	Pole Vectors
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

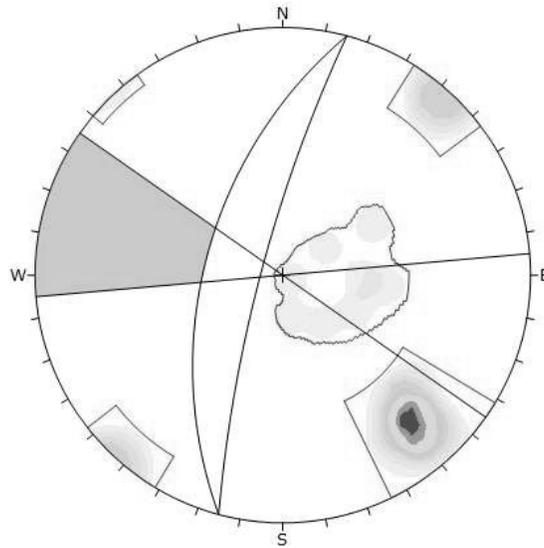
Kinematic Analysis	Direct Toppling
Slope Dip	80
Slope Dip Direction	285
Friction Angle	25°
Lateral Limits	20°
	Critical Total %
Direct Toppling (Intersection)	0 190 0.00%
Oblique Toppling (Intersection)	0 190 0.00%
Base Plane (All)	6 20 30.00%
Base Plane (Set 2)	6 8 75.00%

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	20 (20 Entries)
Intersection Mode	Grid Data Planes
Intersections Count	190
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Figura 22 - Análise cinemática para ruptura por tombamento flexural envolvendo as três famílias de discontinuidades.

6.2.4. Análise cinemática para ruptura por tombamento flexural

Considerando a Figura 23, é possível constatar que nenhum dos polos das descontinuidades que compõem as três famílias se encontram no interior da zona crítica para essa ruptura por tombamento flexural. Logo, apesar de ser um mecanismo de ruptura bastante presente em maciços rochosos compostos por filitos, não há presença de tombamento flexural no talude estudado.



Color	Density Concentrations		
	0.00	-	3.00
	3.00	-	6.00
	6.00	-	9.00
	9.00	-	12.00
	12.00	-	15.00
	15.00	-	18.00
	18.00	-	21.00
	21.00	-	24.00
	24.00	-	27.00
	27.00	-	30.00
Maximum Density	29.22%		
Contour Data	Pole Vectors		
Contour Distribution	Fisher		
Counting Circle Size	1.0%		
Kinematic Analysis	Flexural Toppling		
Slope Dip	80		
Slope Dip Direction	285		
Friction Angle	25°		
Lateral Limits	20°		
	Critical	Total	%
Flexural Toppling (All)	0	20	0.00%
Plot Mode	Pole Vectors		
Vector Count	20 (20 Entries)		
Hemisphere	Lower		
Projection	Equal Angle		

Figura 23 - Análise cinemática para ruptura por tombamento flexural envolvendo as três famílias de descontinuidades.

6.3. Estudo de estabilidade

Após a interpretação do comportamento das três famílias a partir de análise cinemática, constatou-se que existe apenas risco de ruptura planar e ruptura em cunha no talude estudado. Portanto, realizou-se a análise de estabilidade através de métodos determinísticos para os casos em que foram observados riscos de ruptura, utilizando para esse estudo o programa RocPlane para ruptura planar e SWedge para ruptura em cunha.

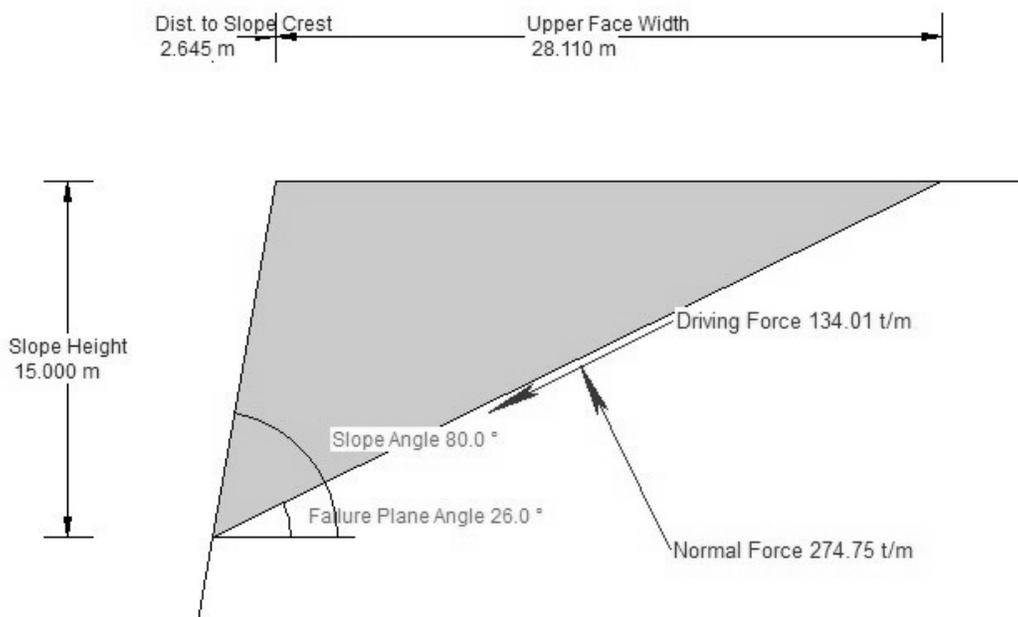
O talude de filito (CAS-02) pesquisado por ÁVILA (2012), apresenta 15 metros de altura constante, e se encontra sem presença de água em seu interior, além de não apresentar fendas de tração e mergulho na face superior. Para ambas as análises, considerou-se peso específico do material constante de 1,45 t/m³, a partir do valor de densidade calculado por ÁVILA (2012).

6.3.1. Estudo de estabilidade para ruptura planar

Para a análise desse tipo de ruptura, utilizou-se como critério de resistência do maciço rochoso o modelo generalizado de Hoek-Brown. Os dados de entrada no software são os descritos na Tabela 9. O valor de UCS considerado para o modelamento foi obtido a partir da resistência a compressão (σ_c) encontrada por ÁVILA (2012), igual à 14 MPa. A constante de rocha intacta (m_i) utilizada foi a correspondente a filitos, enquanto o índice de resistência geológico (GSI) usado foi definido a partir da qualidade do maciço observada por Ávila (2012). Como se trata simplesmente de um talude de estrada considerou-se um fator de perturbação intermediário, já que não há fatores externos capazes de gerar grandes abalos ao talude em questão. Como a Família 2 é a única que apresentou risco de causar ruptura planar, realizou-se estudo apenas da influência deste grupo de descontinuidades no talude. O valor de atitude da Família 2 adotado para análise é o médio obtido durante a observação da estereografia, de 026/280.

6.3.1.1. Representação Gráfica, Ruptura Planar

A Figura 24 ilustra a representação bidimensional das dimensões do bloco gerado pela análise de estabilidade para ruptura planar levando em consideração a Família 2. As dimensões calculadas indicam massa da cunha igual a 305,43 t e volume de 210,82 m³ por cada metro de extensão do talude.



Factor of Safety	3.60
Driving Force	134.01t/m
Resisting Force	482.15t/m
Wedge Weight	305.69t/m
Wedge Volume	210.82m ³ /m
Shear Strength	482.15t/m ²
Normal Force	274.75t/m
Plane Waviness	0.0°

Figura 24 - Vista bidimensional do bloco formado, representando uma seção do talude.

É possível notar que, para esse tipo de análise, foi apresentado um valor de fator de segurança de 3,60, indicando que o talude estudado está em boas condições de estabilidade.

Objetivando uma melhor visualização das dimensões e geometria do bloco formado durante a análise de estabilidade, obteve-se o modelo tridimensional do talude. A vista em perspectiva do bloco formado pode ser observada na Figura 25.

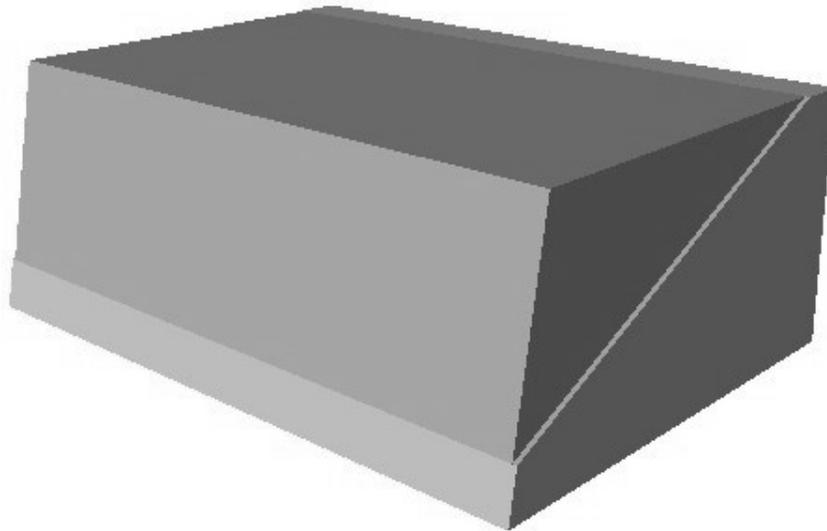


Figura 25 - Modelo tridimensional do bloco formado (em marrom), representando o talude em perspectiva.

6.3.2. Estudo de estabilidade para ruptura em cunha

Interpretando os resultados encontrados durante a análise cinemática para rupturas em cunha englobando todas as famílias de descontinuidades, é notável que as interseções influenciadoras na formação de cunhas capazes de sofrer ruptura são as geradas na interação entre as famílias 1 e 2, 1 e 3, e 2 e 3.

Para essa análise, considerou-se os dados de entrada no software descritos na Tabela 10. A Família 1 foi classificada por ÁVILA (2012) através do sistema RMR como tendo classe IV, o que a confere os valores de coesão e ângulos de atrito apresentados. Já as Famílias 2 e 3 possuem classificação III pelo sistema RMR tendo, portanto, valores mais elevados de coesão e ângulos de atrito quando

comparadas à primeira família de descontinuidades. Para se realizar um estudo mais conservador, foram utilizados os menores valores de coesão e ângulo de atrito para todas as descontinuidades, visando-se observar o pior cenário.

Um ponto importante anterior a leitura dos resultados é que os fatores de segurança obtidos nas análises de estabilidade referentes a ruptura em cunha são maiores que 1, refletindo a realidade da área em estudo que não apresenta problemas de estabilidade. Porém os valores em si dos fatores de segurança para ruptura em cunha podem ser interpretados como valores incompatíveis, pois os fatores de segurança são excessivamente grandes. Acredita-se que isso acontece devido a formação dos blocos no software. O software forma os blocos pela interseção dos planos, gerando blocos de grandes dimensões, o que não é visto na prática. Assim o cálculo do peso destes blocos interfere no valor do fator de segurança. De fato, os dados inseridos estão corretos e o fator de segurança indica estabilidade que reflete a realidade, por isso, manteve-se estes resultados.

6.3.2.1 Interseção entre as Famílias 1 e 2

Apresentando um fator de segurança de 8,696, a cunha formada pela interseção entre as famílias 1 e 2 se apresenta estável. O fator que permite com que o bloco permaneça estável é o fato de a cunha estar sendo formada quase no limite da zona de formação de cunhas, anteriormente observado durante a análise cinemática.

O estudo de estabilidade também indicou a formação de uma cunha com volume de 20413,7 m³ e peso de 29599,9 toneladas, enquanto a interseção entre as Famílias 1 e 2 possui 47,74 m. As vistas frontal, superior e em perfil do talude estão representadas, respectivamente, nas Figuras 27, 28 e 29.

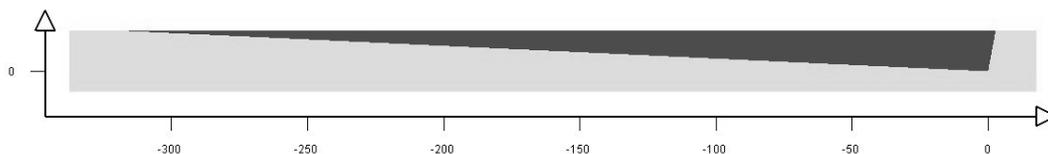


Figura 27 - Vista frontal do talude apresentando a cunha formada pela interseção entre as famílias 1 e 2.

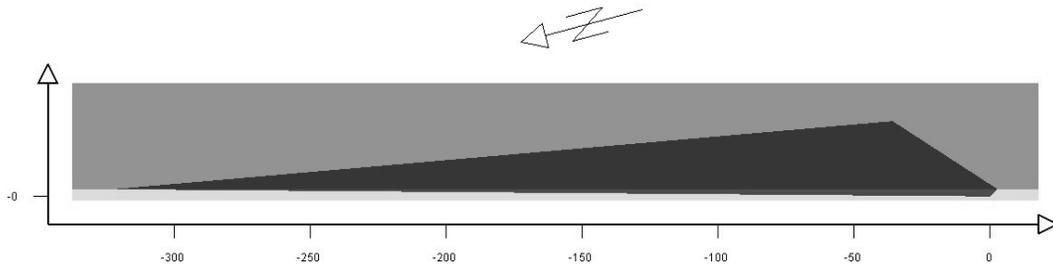


Figura 28 - Vista superior do talude apresentando a cunha formada pela interseção entre as famílias 1 e 2.

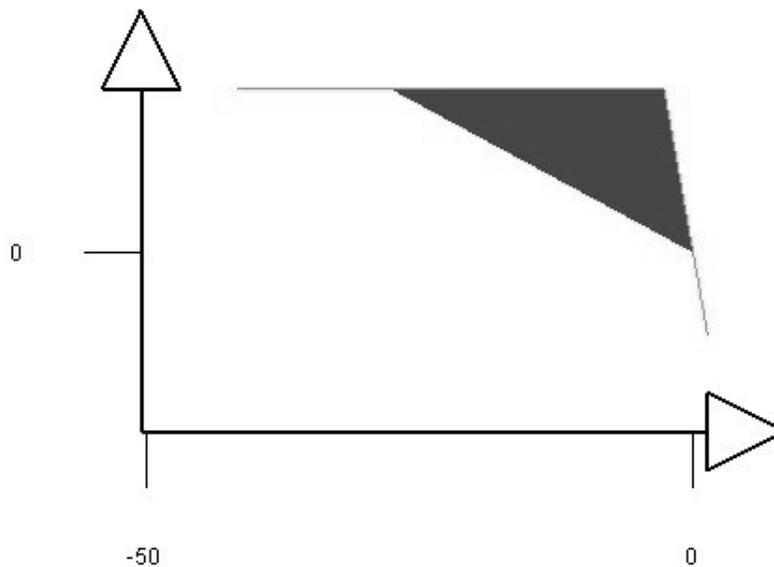


Figura 29 - Vista em perfil do talude apresentando a cunha formada pela interseção entre as famílias 1 e 2.

6.3.2.2. Interseção entre as Famílias 1 e 3

O modelo gerado após análise de estabilidade considerando a interação entre as Famílias 1 e 3 apresentou um fator de segurança de 44.403, e também permitiu a visualização da formação de uma cunha de volume igual a 5,048 m³. O peso do bloco formado é equivalente a 7,32 toneladas, e a interseção formada entre os planos das Famílias 1 e 3 possui comprimento igual a 15,487 m. As Figuras 30, 31 e 32 expõem as vistas frontal, superior e em perfil, respectivamente.

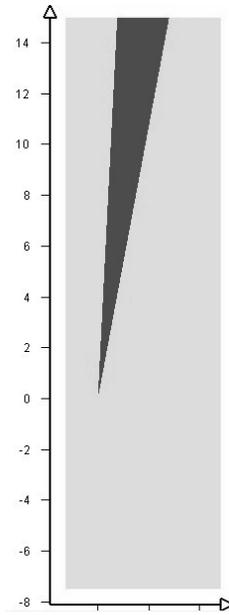


Figura 30 - Vista frontal do talude apresentando a cunha formada pela interseção entre as famílias 1 e 3.

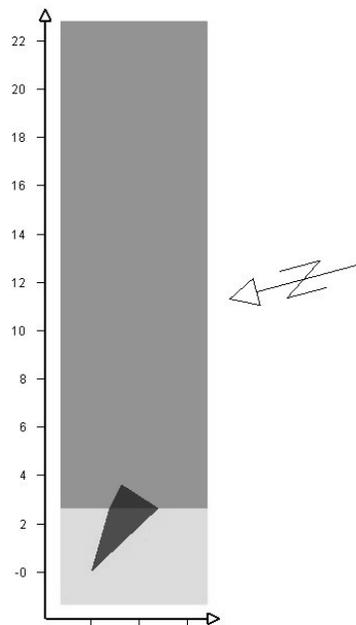


Figura 31 - Vista superior do talude apresentando a cunha formada pela interseção entre as famílias 1 e 3.

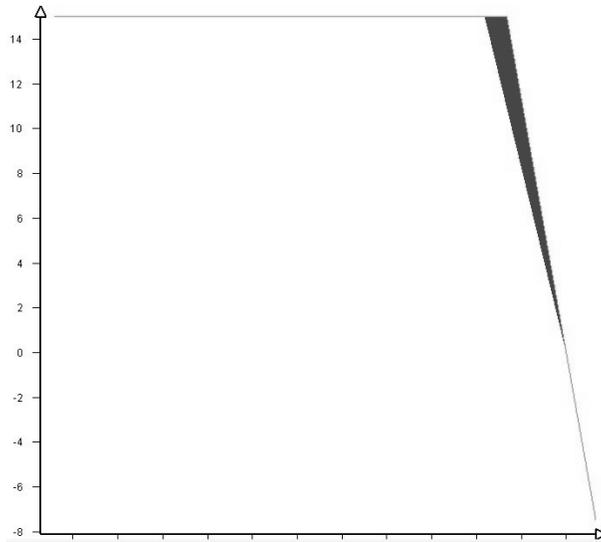


Figura 32 - Vista em perfil do talude apresentando a cunha formada pela interseção entre as famílias 1 e 3.

6.3.2.3. Interseção entre as Famílias 2 e 3

Após realização de análise de estabilidade levando em consideração a interseção entre as famílias 2 e 3, obteve-se o valor de fator de segurança igual a 10,67. A cunha formada possui volume de 23942,5 m³ e peso igual a 34716,6 toneladas. A interseção gerada pela interação entre as famílias 2 e 3 possui 38,95 m de comprimento. Apesar das grandes dimensões, a cunha formada apresenta elevado fator de segurança, derivado principalmente posição onde a cunha é formada. O modelo tridimensional gerado pode ser observado nas Figuras 33, 34 e 35, representando as vistas frontal, superior e em perfil, respectivamente.

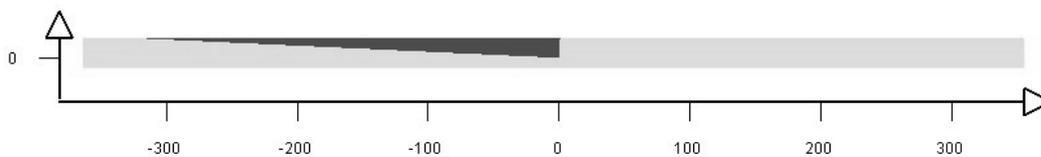


Figura 33 - Vista frontal do talude apresentando a cunha formada pela interseção entre as famílias 2 e 3.

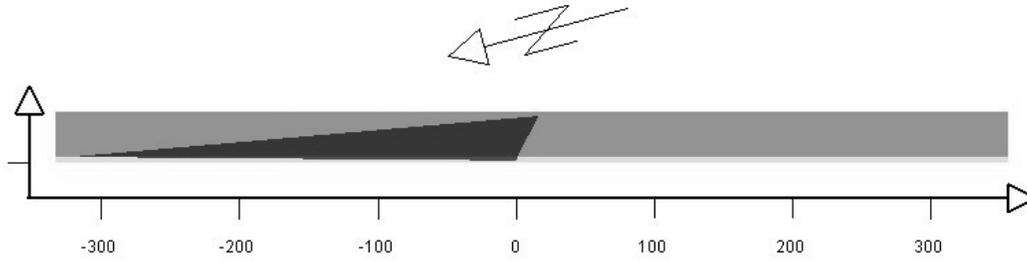


Figura 34 - Vista superior do talude apresentando a cunha formada pela interseção entre as famílias 2 e 3.

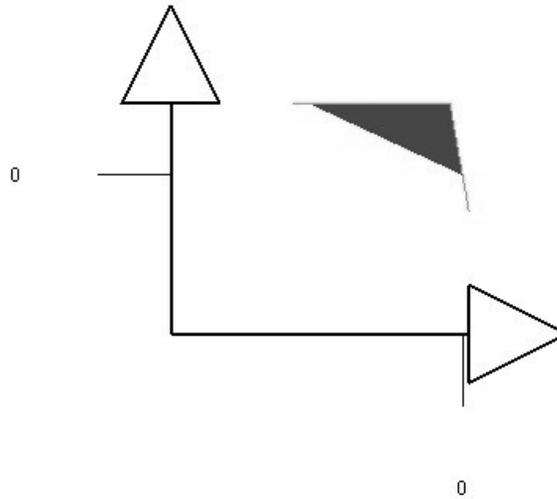


Figura 35 - Vista em perfil do talude apresentando a cunha formada pela interseção entre as famílias 2 e 3.

7. CONCLUSÃO

O estudo de estabilidade de talude em áreas urbanas pode auxiliar no planejamento urbano com a identificação de áreas suscetíveis ao desenvolvimento de rupturas. Neste contexto, o presente trabalho apresentou um estudo de estabilidade de um talude rochoso localizado na região metropolitana de Belo Horizonte, identificando os possíveis modos de ruptura e suas respectivas análises de estabilidade. Trabalhos anteriores na área de estudo indicaram tanto a caracterização como o levantamento de descontinuidades do maciço rochoso. Estes resultados indicaram a existência de três famílias de descontinuidade sendo estas estudadas na presente pesquisa.

O resultado da análise cinemática indicou probabilidades consideráveis para dois tipos de ruptura, ruptura planar e ruptura em cunha. A probabilidade de ruptura planar foi de 37,5%, enquanto a ruptura em cunha apresentou valores de 55,26%. Na projeção estereográfica foi observada a ruptura planar por uma família de descontinuidade. Para ruptura em cunha, todas as combinações possíveis de interseção entre as três famílias de descontinuidades se mostraram em posição de possível ocorrência de ruptura. As análises de estabilidade mostraram que o talude tem bons índices de estabilidade, fatores de segurança maior que 1, ou seja, estável para os tipos de ruptura indicados pela análise cinemática.

Embora os resultados não indiquem problemas graves para a área em estudo, a presente pesquisa contribui com um estudo de estabilidade para uma área urbana de Belo Horizonte, indicando os principais modos de ruptura além de um estudo de estabilidade indicando os fatores de segurança para cada tipo de ruptura.

8. BIBLIOGRAFIA

ABRAMSON, L. W. *et al.* Slope Stability and Stabilization Methods. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002.

ALMEIDA, L. G. *et al.* O Grupo Sabará no Sinclinal Dom Bosco, Quadrilátero Ferrífero: Uma Revisão Estratigráfica. *Revista Brasileira de Geociências*, Ouro Preto, 2005.

ASSIS, A. P. Mecânica de rochas: Apostila do curso básico. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, 2013. 205 p.

ÁVILA, C. R. Determinação das Propriedades Mecânicas de Maciços Rochosos e/ou Descontinuidades Utilizando Classificações Geomecânicas - Uma Comparação Entre os Diversos Métodos de Classificação. 2012. Tese (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

BIENIAWSKI, Z. T. Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil and Petroleum Engineering. John Wiley & Sons, 1989.

CAMPOS, L.A. Correlações Entre Classificações Geomecânicas Ajustadas, Estudo de Caso em Maciços Rochosos do Quadrilátero Ferrífero - Minas Gerais, Brasil. 2018. Tese (Pós-Graduação) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.

FREITAS, S.B.N. Caracterização Geomecânica e Classificações RMR (Bieniawsky) e SMR (Romana) de Maciços Rochosos em Taludes do Funchal. 2011. Tese (Mestrado) – Colégio dos Jesuítas, Funchal, 2011.

HOEK, E.; BROWN, E.T. The Hoek - Brown failure criterion and GSI: 2018 edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019.

LABUZ, J.F., ZANG, A. Mohr–Coulomb Failure Criterion. *Rock Mech Rock Eng* 45, 975–979 (2012). <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0281-7>

MAIA, P. C. A.; SAYÃO, A. S. F.J.; SALLES, R. O. Aplicação de retroanálise probabilística para avaliação da estabilidade de taludes. *Vértices*, Rio de Janeiro, jan./abr. 2010.

SILVA, C. C. Análise De Estabilidade De Um Talude Da Cava De Alegria Utilizando Abordagem Probabilística. 2015. Tese (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

SINGH, B.; GOEL, R. K. Engineering Rock Mass Classification: Tunneling, Foundations and Landslides. Oxford: Elsevier Inc., 2011.

WILLYE, D. C.; MAH, C. W. Rock Slope Engineering: Civil and Mining. New York: Spon Press, 2004.