

17º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental

AVALIAÇÃO DA INSTABILIDADE DE UM TALUDE POR TOMBAMENTO NAS IMEDIAÇÕES DA ETE TEGA, MUNICÍPIO DE CAXIAS DO SUL/RS

Guilherme Zenato Lazzari ¹; Fernando Eduardo Boff ²; Tiago De Vargas ³; Rossano Belladona ⁴

Resumo – O presente trabalho teve como objetivo realizar a avaliação da estabilidade de um talude de rocha vulcânica de composição dacítica, no município de Caxias do Sul, estado do Rio Grande do Sul, encontrado na área onde se opera a Estação de Tratamento de Esgoto Tega. Foram realizados levantamentos sistemáticos de descontinuidade, ensaios de laboratório para determinação de peso específico, compilação e organização de dados, determinação do índice RQD, Classificação Geomecânica (RMR), determinação de valores de coesão e ângulo de atrito, análise cinemática e simulações em *software* geotécnico. Em razão do comportamento geomecânico distinto o talude avaliado foi compartimentado em três setores, realizou-se posteriormente a análise e determinação de parâmetros individuais destes. Para determinação dos índices de RQD, RMR, coesão e ângulo de atrito foi utilizado a planilha eletrônica, para a obtenção de projeções estereográficas e análise cinemática foi utilizado o *software* Stereonet v.11 de Rick Allmendinger e para as simulações de estabilidade e determinação do fator de segurança foi utilizado o *software* RocTopple da Rocscience. Os mecanismos de ruptura identificados através da análise cinemática para o talude em estudo foram os de ruptura por tombamento. Foi observado que o Talude 3 apresenta uma suscetibilidade maior a processos de ruptura e queda de blocos, enquanto o Talude 1 e 2 apresentam condições melhores, embora tenham apresentado fatores de segurança que necessitem de medidas de estabilização. Sugeriu-se a avaliação referente a aplicação de malhas metálicas atirantadas e faceamento de concreto em áreas com maiores exposições, buscando evitar possíveis rupturas e desprendimentos de blocos menores, a aplicação de drenagem superficial também seria adequada como forma de disciplinar as águas do escoamento superficial.

Abstract – This study aimed to assess the stability of a slope of volcanic rock of dacitic composition in the city of Caxias do Sul, state of Rio Grande do Sul, found in the area where the Tega Sewage Treatment Station operates. Systematic discontinuity surveys, laboratory tests to determine specific weight, compilation and organization of data, determination of the RQD index, Geomechanics Classification (RMR), determination of cohesion and friction angle values, kinematic analysis and simulations in geotechnical software were performed. Due to the different geomechanical behavior, the evaluated slope was divided into three sectors, subsequently performing the analysis and determination of individual parameters for each of these. To determine the indexes of RQD, RMR, cohesion and angle of friction, an electronic spreadsheet was used, to obtain stereographic projections and kinematic analysis, Rick Allmendinger's Stereonet v.11 software was used and for simulations of stability and determination of the factor of safety the RocTopple software from Rocscience was used. The rupture mechanisms identified through the kinematic analysis for the slope under study were the toppling failure. It was observed that Slope 3 presents a greater susceptibility to rupture and fall of blocks, while Slope 1 and 2 present better conditions, although they have presented safety factors that need stabilization measures. An evaluation was suggested regarding the application of tossed metal meshes and concrete facing in areas with greater exposures, seeking to avoid possible ruptures and detachments from smaller blocks, the application of surface drainage would also be adequate as a way of disciplining the runoff waters.

Palavras-Chave – Estabilidade. Talude. Análise. Estabilização.

¹ Eng. Ambiental, Centro Universitário da Serra Gaúcha (FSG) e Garden Projetos, lazzariguilherme@gmail.com

² Geól., MSc., Napeia Consultoria e Projetos, (54) 3223.9188, fernandoeboff@gmail.com

³ Geól., Dr., Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto, (54) 3220-8600, tvargas@samaecaxias.com.br

⁴ Eng. Ambiental, MSc., Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto, (54) 3220-8600, rbelladona@samaecaxias.com.br

1. INTRODUÇÃO

O deslizamento e queda de blocos rochosos, ou até o tombamento dos mesmos, são eventos recorrentes em diversos locais do mundo, alguns deles em rodovias, ou muitas vezes na proximidade de residências. Esses eventos trazem danos materiais, ambientais e também a vida. Para Robaina et al. (2008) os riscos associados aos processos naturais, como movimentos de massa em encosta, é um dos problemas que vem aumentando com o tempo, principalmente em períodos chuvosos, que influencia nos processos de instabilidade.

O município de Caxias do Sul, RS, possui combinações de áreas declivosas e substratos rochosos com descontinuidades marcantes que favorecem a ocorrência de movimentos de massa (Robaina et al. (2008). Eventos recentes denotam a ocorrência e complexidade de soluções para estes problemas, como é o caso de Rodovias Estaduais, ERS-486, Rota do Sol, trecho de Itati, ocorrido em 22 de maio de 2019 (PIONEIRO, 2020a, 2020b). Outro local afetado pela queda de barreiras foi o trecho da ERS-122, entre São Vendelino e Farroupilha (JORNAL DO COMÉRCIO, CORREIO DO POVO, 2020). Ambos os eventos ocorreram devido às fortes chuvas, e às fraturas presentes nos maciços rochosos da região, que favorecem o fluxo de água, fornecendo condições propícias aos deslizamentos, quedas ou tombamento de blocos.

Considerando o histórico de eventos de movimento de massa associados às condições climáticas no município de Caxias do Sul, esse estudo tem por objetivo avaliar o comportamento de um talude de rochas encontrado em uma das áreas pertencentes ao Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto (SAMAE), mais especificamente na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Tega, onde processos de instabilidade já tinham sido observados, como queda de alguns blocos e blocos relativamente soltos com eminência de queda. Para tanto, será realizada a análise deste maciço rochoso, buscando identificar o processo de instabilidade ocorrente, através do levantamento de suas características e comportamento, possibilitando a compilação de dados e estudo de sua cinemática, assim como modelagens de instabilidade e medidas de estabilização.

2. MATERIAL E MÉTODOS

As etapas e atividades desenvolvidas no presente trabalho podem ser vistas na Figura 1. Foram realizadas visitas a campo, ensaios em laboratório, tratamento estatístico de dados, utilização de ferramentas computacionais de modelagem e a metodologia utilizada e apresentada também poderá ser utilizada para o estudo de taludes e encostas com características similares. Visto que o processo principal de instabilidade observado foi o tombamento, optou-se por realizar a aplicação de duas técnicas para avaliação de estabilidade do talude. A de análise cinemática, avaliando através da projeção estereográfica, e a do método de equilíbrio limite de Goodman & Bray (1976). Essas análises foram desenvolvidas utilizando os softwares Stereonet v.11 e RocTopple, respectivamente. O estudo de campo e demais atividades ocorreram entre os meses de julho de 2019 e fevereiro de 2020.

O talude em estudo localiza-se na área da ETE Tega, em Caxias do Sul (RS), Figura 2, coordenadas planas, N 6775110 m, E 476839, Projeção UTM Zona 22S, Datum SIRGAS 2000, coordenadas geográficas, Latitude -29.152359, Longitude -51.238139.

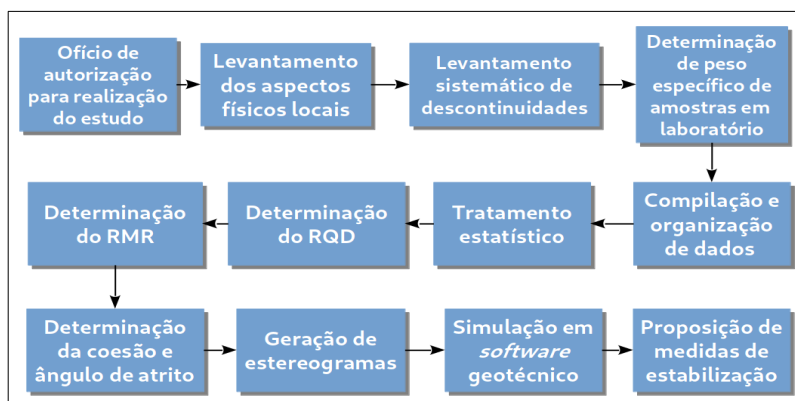


Figura 1. Fluxograma de realização do estudo.

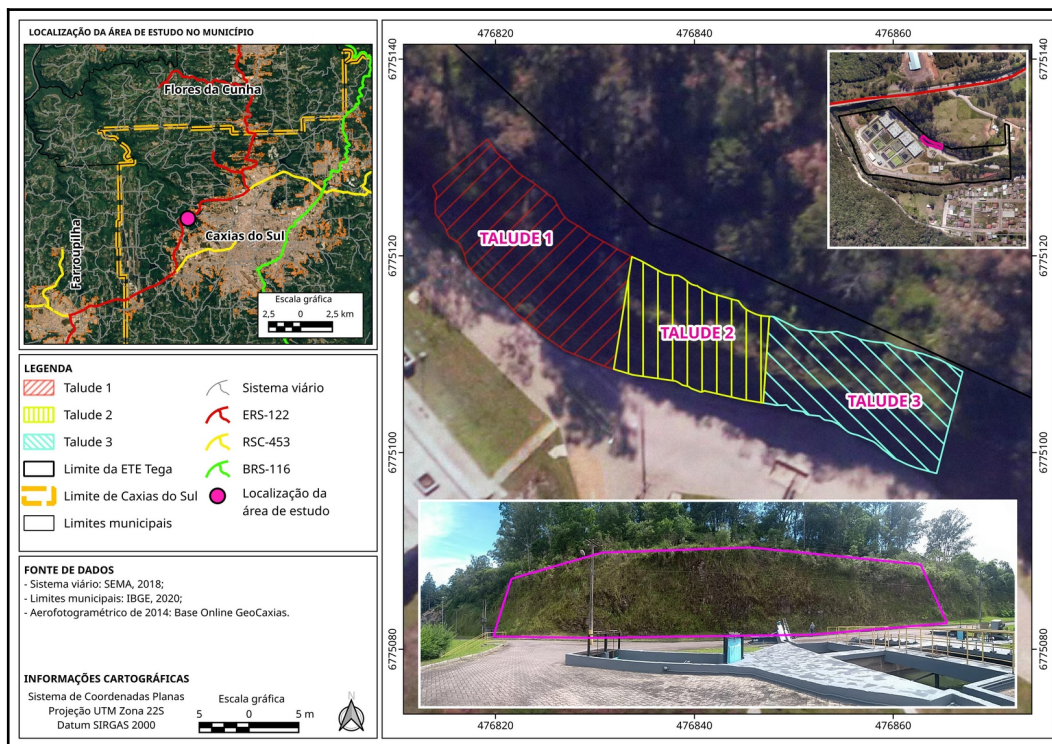


Figura 2. Localização e situação da área em estudo.

2.1. Aspectos Físicos Locais

2.1.1. Clima

Conforme Rossato (2011) o clima do município de Caxias do Sul pode ser classificado como Subtropical IV b, considerado muito úmido com inverno frio e verões frescos. Esta área possui menor influência dos sistemas polares, porém com maior atuação dos sistemas tropicais marítimos com efeito do relevo e altitude (Planalto Basáltico), os sistemas frontais são responsáveis pela maior parte das precipitações. Conforme a autora o município recebe chuvas abundantes que oscilam entre 1.700 e 2.000 mm anuais, bem distribuídas em 130-150 dias, mensalmente sendo a região com a maior quantidade de dias chuvosos, totalizando de 12 a 15 dias. A temperatura média anual varia entre 14 e 17 °C, a média do mês mais frio oscila entre 8 a 14 °C e a do mês mais quente entre 17 e 23 °C, sendo considerada a região com o conjunto de médias mais baixo do Rio Grande do Sul. De acordo com os estudos realizados por Belladonna & Vargas (2017) a área em estudo situa-se nas zonas de maior pluviosidade do município, para dados do ano de 2014, com cerca de 2.050 a 2.103 mm anuais.

2.1.2. Geomorfologia e Geologia

O município de Caxias do Sul está inserido na região Geomorfológica Planalto das Araucárias, especificamente, nas Unidades Geomorfológicas Planalto dos Campos Gerais e Serra Geral (IBGE – PROJETO RADAMBRASIL, 1986). O trecho em estudo localiza-se no Planalto dos Campos Gerais, nas proximidades de um Vale ou Sulco estrutural, entre as cotas 606,5 m e 621 m e declivosa, o que favorece processos de instabilidade. Compõe um modelado de Dissecção com densidade de drenagem grosseira e aprofundamento das incisões muito fraco, com predisposições à erosão média.

O local de estudo insere-se na unidade geológica Formação Serra Geral, que recobre a metade norte do Estado do Rio Grande do Sul. Essa unidade geológica é representada por uma sucessão de derrames de lavas vulcânicas básicas (Fácies Gramado) e ácidas (Fácies Caxias), que estão sobrepostas aos arenitos da Formação Botucatu (BRESSANI et al., 2005). A área em estudo situa-se na Fácies Caxias, que são derrames de composição intermediária a ácida, formados riodacitos a riolitos, mesocráticos, microgranulares a vitrofíricos, textura esferulítica comum (Dacito Caxias/Carijó), forte disjunção tabular no topo dos derrames e maciço na porção central, dobras de fluxo e autobrechuras frequentes, vesículas preenchidas predominantemente

por ágata e calcedônia, fonte das mineralizações da região (Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais – CPRM).

Conforme estudo de Borsatto et al. de 2012 a área estudada encontra-se na porção do Dacito Caxias/Carijó, de maior abrangência na região, ocupa a parte central do município e grande parte da área ao sul e ao centro. Apresenta coloração cinza oliva clara e granulação média, aspecto maciço com cerca de 30 cm de espessura e estratos tabulares sub-horizontais na porção basal, com espessuras de 5 a 30 cm (BRESSANI; FLORES; NUNES, 2005b).

Em relação ao comportamento geotécnico dos solos, a área de estudo situa-se em porções que originou os Solos Caxias/Carijó, que conforme Bressani et al. (2005c) são solos saprolíticos pouco ou não-plásticos, cinza e levemente avermelhados, estruturas estratificadas horizontais geralmente bem visíveis, originados da alteração das porções medianas do Dacito Caxias/Carijó. Essa rocha dacítica apresenta bom comportamento geotécnico, sendo um bom material para utilização em construções e sua granulometria depende do grau de intemperismo, podendo ter agregados frágeis de grãos.

2.2. Levantamento Sistemático de Descontinuidades

A primeira etapa realizada foi o levantamento de descontinuidades em campo, a partir do método *scanline*, onde foram realizadas onze visitas a campo para mapeamento dos parâmetros de descontinuidade. Foram medidos 57 pontos, entre o período de outubro de 2019 até fevereiro de 2020, em uma extensão de 61,80 metros. No talude de estudo foi possível observar três famílias de descontinuidades, considerando Família 1 (F1) as descontinuidades com face frontal, Família 2 (F2), descontinuidades subverticais e Família 3 (F3) descontinuidades sub-horizontais, foram coletados então 24 dados para F1, 17 para F2 e 16 para F3, possibilitando posteriormente a geração de projeções estereográficas e de análise estatística geral e por família.

O levantamento seguiu uma planilha desenvolvida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), adaptada com as escalas e *ranges* do sistema Classificação de Massa de Rocha (*Rock Mass Rating* - RMR), seguindo a metodologia de Bieniawski (1989).

2.3. Determinação do peso específico de amostras em laboratório

As amostras foram coletadas nos dias 19 de outubro, 9 de novembro e 30 de novembro de 2019, as distâncias de coleta foram 4 metros, 38,50 metros, e 54,70 metros respectivamente. Foram analisadas no dia 18 de dezembro de 2019 no Laboratório de Materiais do Centro Universitário da Serra Gaúcha, onde as condições do laboratório na data eram de 23,2 °C e 61% de umidade.

Quadro 1. Características das amostras coletadas.

Ponto e Data	Distância (m)	Amostra/Talude	Apenas Amostra (g)	Amostra e Proveta com água (g)	Pesagem Amostra Água e Proveta (g)	Volume de água deslocado (cm ³)	Massa específica (g/cm ³)	Peso específico (kN/m ³)
Ponto 2 19/10/19	4,00	Amostra 1 Talude 1	397,12	1.651,48	1.488,65	162,83	2,439	24,389
Ponto 12 09/11/19	38,50	Amostra 2 Talude 2	521,40	1.775,76	1.555,20	220,56	2,364	23,640
Ponto 22 30/11/19	54,70	Amostra 3 Talude 3	479,76	1.734,12	1.533,05	201,07	2,386	23,860

2.4. Compilação e organização dos dados

Os dados foram coletados em campo e ordenados pelo tipo de família, por exemplo, primeiro todos da Família 1 e assim por diante. Posteriormente os mesmos foram compilados em planilha eletrônica com o uso do LibreOffice Calc. O total de 57 medições foi dividido em três taludes, cada um com 19 medições, que representassem uma maior similaridade entre os parâmetros obtidos. A subdivisão em taludes compõe o Talude 1, 2 e 3, sendo o primeiro até a extensão dos 27,80 m, o segundo até 43 m, possuindo uma extensão de 15,20 m, e o último até 61,80 m, com uma extensão de 18,80 m. Essa divisão foi realizada levando em conta as

características similares do maciço, condições de instabilidade e as orientações de corte do talude. Os dados de campo foram filtrados e inseridos em outra planilha para organização e criação de histogramas, com os dados numéricos obtidos, tanto para o talude em geral quanto para suas subdivisões.

2.5. Tratamento estatístico

O tratamento estatístico de dados, com a criação dos histogramas, é uma etapa importante, pois possibilita uma melhor visualização dos dados coletados, assim como a análise dos mesmos. Os dados apresentados pelos histogramas, quanto as representatividades de classes obtidas no levantamento de campo, são posteriormente, utilizadas para determinação do RMR. Foram gerados 14 histogramas, para cada subdivisão, separados em quantidade geral e por família, possibilitando, assim, entender as representatividades de cada descontinuidade de uma forma diferente. Os histogramas foram utilizados para observar qual a classe com maior prevalência, referente a cada um dos parâmetros coletados em campo, possibilitando determinar a característica e peso que seria utilizado na determinação do RMR.

2.6. Determinação do Rock Quality Designation (RQD)

No presente estudo o Índice de Qualidade da Rocha (*Rock Quality Designation Index - RQD*) foi utilizado como componente da classificação RMR de 1989 e foi determinado a partir do espaçamento médio de descontinuidades, referente a cada família, e a cada talude. Os espaçamentos médios das descontinuidades para cada um dos taludes são apresentados pela Tabela 1, e os valores obtidos para a Contagem Volumétrica da Junta (*Volumetric Joint Count - Jv*) e RQD são apresentados pela Tabela 2.

Tabela 1. Espaçamentos médios entre as descontinuidades (m).

Taludes	Família 1	Família 2	Família 3
Talude 1	0,21	4,49	0,48
Talude 2	0,48	0,49	0,28
Talude 3	0,23	0,23	0,13

Tabela 2. Valores obtidos para Jv e RQD.

	Talude 1	Talude 2	Talude 3
Jv	7,13	7,66	16,40
RQD	91,47	89,71	60,87

2.7. Determinação do Rock Mass Rating (RMR)

A determinação do RMR, foi realizada com base na tabela adaptada de Bieniawski (1989). Foi criada uma planilha eletrônica para determinação das pontuações de cada uma das subdivisões estipuladas, identificando as características prevalentes de cada um destes, tais como, espaçamento de fraturas, resistência da rocha, comprimento, abertura, rugosidade, preenchimento, alteração, exsudação de água e correção com as orientações de direção e mergulho. Para determinação das características de maior prevalência foram utilizados os histogramas mencionados em tópicos anteriores, que entregaram os resultados presentes na Tabela 6. A Tabela 3 demonstra as características de maior frequência para cada um dos parâmetros, assim como o resultado final para o RMR, referente a soma dos pesos.

Tabela 3. Tabela de determinação do RMR para subdivisão em Talude 1, 2 e 3.

Parâmetros	Talude 1	Pontuação	Talude 2	Pontuação	Talude 3	Pontuação
Resistência da rocha (MPa)	5-25	2	5-25	2	5-25	2
RQD	91,47	20	89,71	17	60,87	13
Espaçamento de fraturas (m)	0,2 m a 0,6 m	10	0,2 m a 0,6 m	10	0,06 m a 0,2 m	8
Persistência	Inferior a 1 m	6	1 m a 3 m	4	3 m a 10 m	2
Abertura	Fechada	6	0,1 mm a 1 mm	4	1 mm a 5 mm	1
Rugosidade	Ligeiramente rugosa	3	Ligeiramente rugosa	3	Ligeiramente e rugosa	3
Preenchimento	Sem preenchimento	6	Argila	2	Argila	2
Alteração	Moderadamente alterada	3	Moderadamente alterada	3	Muito alterada	1
Exsudação de água	Ligeiramente úmido	10	Ligeiramente úmido	10	Ligeiramente e úmido	10
Direção e mergulho	Aceitável	-5	Desfavorável	-10	Muito desfavorável	-12
Soma dos pesos	Soma dos pesos	61	Soma dos pesos	45	Soma dos pesos	30
Qualidade	Qualidade	Boa	Qualidade	Regular	Qualidade	Pobre
Descrição (tempo sustentação, c e Φ)	Coesão (kPa)	300-400	Coesão (kPa)	200-300	Coesão (kPa)	100-200
	Φ	35° – 45°	Φ	25° – 35°	Φ	15° – 25°
	Tempo sustentação	6 meses	Tempo sustentação	1 semana	Tempo sustentação	10 horas

Onde c – coesão; Φ - ângulo de atrito.

2.8. Determinação da coesão e ângulo de atrito

Para a determinação de coesão e ângulo de atrito foi seguido o critério de Hoek-Brown com o objetivo de determinar os parâmetros necessários para o critério de Mohr-Coulomb, que é amplamente utilizado em muitos *softwares* geotécnicos. Para tal foram utilizadas as equações apresentadas por (HOEK; CARRANZA TORRES; CORKUM, 2002) e também em outras edições (HOEK, 2007; HOEK; BROWN, 2019).

Tabela 4. Valores utilizados e obtidos durante os cálculos de coesão e ângulo de atrito.

Parâmetros	Talude 1	Talude 2	Talude 3
Peso específico (MN/m ³)	0,024389	0,02364	0,0249
Altura taludes (m)	12	12,5	12,5
RMR	61	45	30
m_i	17	17	17
D	0,7	0,7	0,7
GSI	56	40	25
m_b	1,515326	0,629084	0,275914
s	0,001701	0,000167	1,902864E-05
a	0,503773	0,511368	0,531267
σ_{ci}	25	23	22
σ_c	1,006428	0,269500	0,068317
σ_t	-0,028056	-0,006117	-0,001517
σ'_{cm}	0,770523	0,083206	0,008846
σ'_{3max}	0,229903	0,189825	0,162656
σ'_{3n}	0,009196	0,008253	0,007393

Onde: m_i - Constante de material rochoso; m_b - Valor reduzido da constante do material m_i ; S - Constante de material rochoso; a - Constante de material rochoso; σ_{ci} - Resistência a compressão uniaxial em material rochoso intacto; σ_c - Resistência a compressão uniaxial; σ_t - Resistência a tensão; σ'_{cm} - Constante de material rochoso; σ'_{3max} - Constante de material rochoso; σ_{3n} - Constante de material rochoso.

Tabela 5. Valores obtidos para ângulo de atrito e coesão.

Talude	Ângulo de atrito (°)	Coesão (MPa)	Coesão (kPa)
1	56	0,16	160,84
2	50	0,08	79,14
3	42	0,05	43,98

2.9. Geração de estereogramas

Para realização da análise cinemática e observação das orientações referentes as descontinuidades foram gerados quatro estereogramas, a respeito do Talude Geral, Talude 1, 2 e 3, com as 57 atitudes estruturais medidas *in loco* com bússola do tipo clar. Para realização destes e determinação dos mecanismos de ruptura do maciço rochoso (circular, planar, em cunha ou tombamento) foi utilizado o *software* Stereonet v. 11, desenvolvido por Allmendinger; Cardozo & Fisher (2011) e tendo seu manual de utilização desenvolvido por Allmendinger (2020).

2.10. Simulação em software geotécnico

Para realização de simulação foi utilizado a versão 2.002 de 10 de abril de 2020, do *software* RocTopple da Rocscience (ROCSCIENCE, 2019), visto que é um programa utilizado para processos de tombamento de blocos, tais como os mecanismos identificados nas projeções estereográficas, e funciona através do método do equilíbrio-limite de Goodman & Bray (1976). Os dados obtidos nos processos anteriores foram inseridos no *software*, como o ângulo de atrito, coesão, peso específico, inclinação do talude, espaçamento médio entre as descontinuidades, entre outros. A modelagem neste programa pode auxiliar no cálculo do Fator de Segurança (FS), assim como na simulação de possíveis medidas de estabilização, visando aumentar estes valores e estudar a melhor medida a ser empregada.

2.11. Proposição de medidas de estabilização

Para estudar possíveis medidas de estabilização foram realizados testes com o *software* RocTopple, simulando medidas de estabilização que pudessem ser aplicadas na condição de estudo. Uma das medidas consistiu em avaliar o efeito da redução da inclinação do talude, observando qual o ângulo mínimo para ter-se um fator de segurança adequado, o que seria viável caso a necessidade de redução não seja demasiadamente elevada. Outra simulação que foi realizada é a aplicação de cargas distribuídas, similar a aplicação de malhas atirantadas pela superfície do talude, foi avaliada a carga mínima necessária para fornecer um grau adequado de estabilidade, ou seja, um fator de segurança maior ou igual a 1,5.

3. ANÁLISE DE RESULTADOS

3.1. Estatística de dados do maciço rochoso

Através dos histogramas referentes aos dados levantados foram observadas as classes predominantes para cada um dos parâmetros, apresentados na Tabela 6. Sendo de extrema importância para determinação dos valores de RMR e determinação posterior dos valores de coesão e ângulo de atrito, para então elaborar os estereogramas e realizar modelagens em softwares geotécnico.

Tabela 6. Classes predominantes para os parâmetros de descontinuidade avaliados.

Parâmetros	Família 1	Família 2	Família 3
Alteração do maciço rochoso	Moderadamente alterada	Levemente alterada	Levemente alterada
Alteração das paredes	Muito alterada	Moderadamente alterada	Moderadamente alterada
Espaçamento	0,2 a 0,6 m	0,2 a 0,6 m	0,06 a 0,2 m
Persistência	1,0 a 3,0 m	3,0 a 10 m	Inferior a 1 m
Abertura	1 a 5 mm e superior a 10 mm	0,1 a 1 mm e 1 a 5 mm	Fechada
Preenchimento	Sem preenchimento e argila	Argila	Sem preenchimento
Exsudação de água	Ligeiramente úmido	Ligeiramente úmido	Seco
Associação entre descontinuidades	Fratura única	Fratura única	Fratura única
Microrugosidade	Áspera	Áspera	Áspera
Macrorugosidade	Ondulada em uma direção	Plana	Plana
Amplitude da asperidade	3 mm	3 mm	1 mm
JRC Ábaco	8	10	3
JRC Perfis	6-8, 8-10 e 12-14	8-10	4-6
Resistência	5-25	5-25	2-25

Onde: JRC - *Joint Roughness Coefficient* (Coeficiente de Rugosidade da Junta).

3.2. Resultados da Análise Cinemática

Na Figura 3 (A) é possível observar as maiores concentrações da Família 1 nos sentidos nordeste e sudoeste, foi identificado o tipo de ruptura por tombamento, visto que as maiores concentrações situam-se fora das envoltórias e cones de atrito, o sentido de tombamento para este Talude é semi-paralelo a sua face. No Talude 2 também foi identificado que o principal mecanismo de ruptura é por tombamento de blocos, o sentido de tombamento é similar ao identificado no Talude, porém direcionado as maiores concentrações de polos, percebendo a intersecção entre os planos das famílias de descontinuidade, Figura 3 (B).

Foi possível observar que a redução dos ângulos de atrito reduz significativamente a área do cone, e conseqüentemente aumenta as zonas que possam apresentar processos de instabilidade. Para o Talude 3, Figura 3 (C), foram observadas as piores condições, visto que possui reduzida qualidade, com ângulos de mergulho maiores que a inclinação do talude, e reduzido ângulo de atrito, permitindo a ocorrência de áreas mais suscetíveis a processos de instabilidade. O processo de ruptura observado neste setor também foi o de tombamento, onde suas principais concentrações de polos situam-se a oeste, para onde também é seu sentido de tombamento, devido ao ângulo de atrito ser menor, a área crítica para instabilidades apresenta-se maior e compreende uma disposição maior de polos.

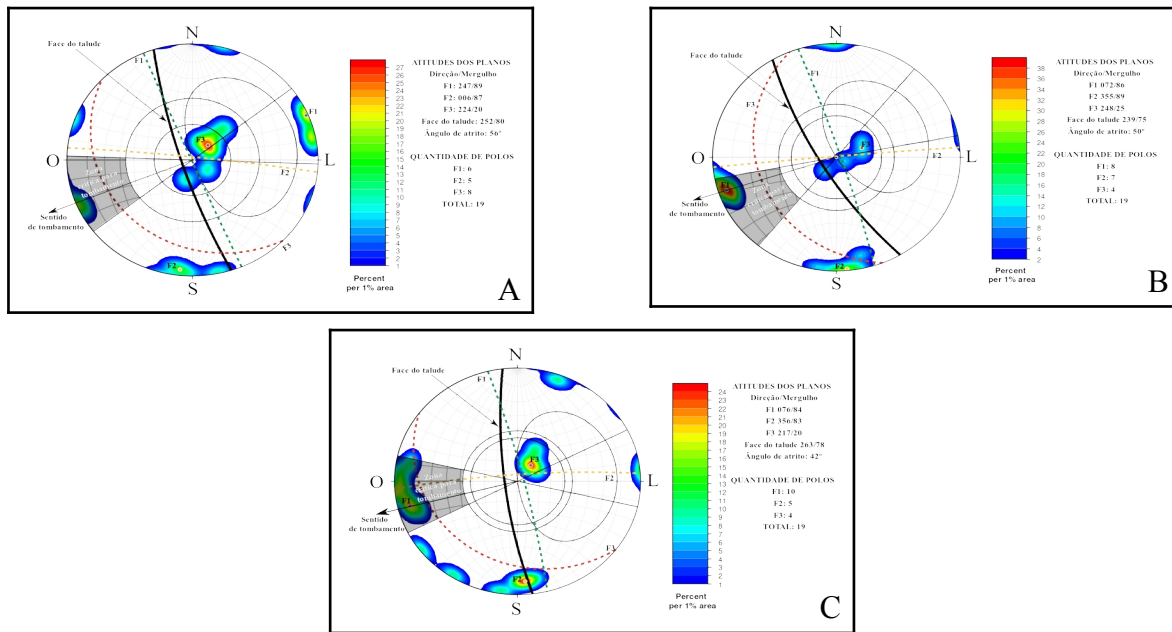


Figura 3. Projeções estereográficas; (A) Talude 1; (B) Talude 2; (C) Talude 3.

3.3. Análise da simulação no RocTopple

Em detrimento da necessidade de outros tipos de análise foi utilizado o software geotécnico RocTopple, da empresa Rocscience, que possibilitou a realização de simulação pelo método do equilíbrio limite de Goodman & Bray (1976), auxiliando nos cálculos do fator de segurança para cada um dos casos. Seguem os resultados da modelagem no RocTopple para a subdivisão referente ao Talude 3, de forma a exemplificar as simulações realizadas, Figura 4.

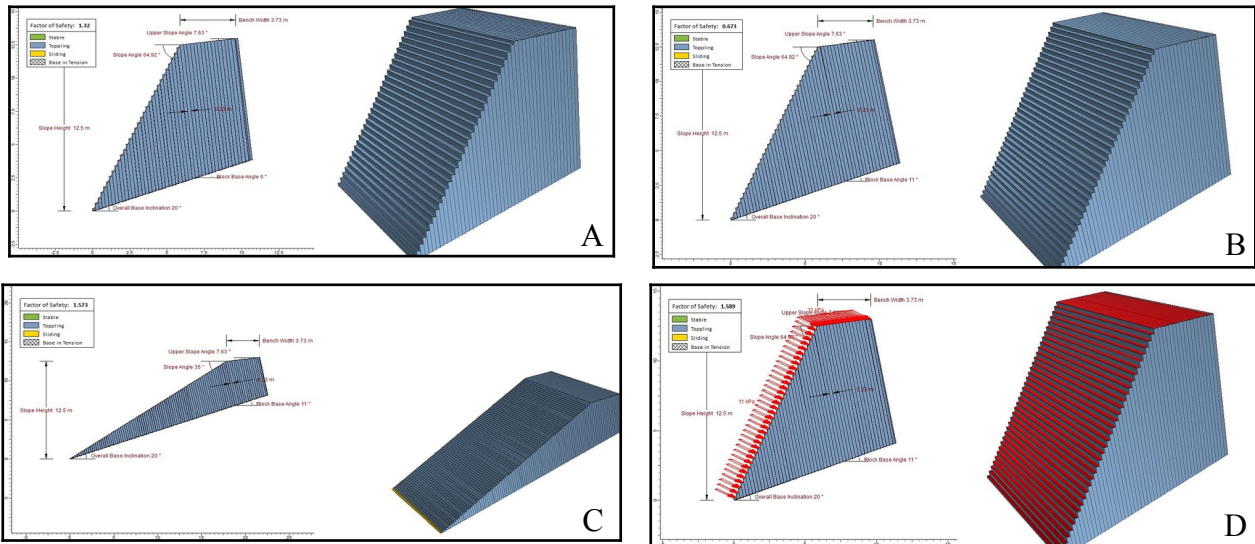


Figura 4. Simulação da estabilidade do Talude 3; (A) Condições originais; (B) Redução de 5° no ângulo de mergulho; (C) redução de 30] na inclinação; (D) aplicação de carga distribuída de 11 kN.

Percebe-se que os valores fornecidos pelo programa auxiliam na tomada de decisões e podem fornecer subsídio para o estudo de possíveis medidas de estabilização nos taludes em estudo. A condição mais suscetível a tombamento e riscos de ruptura com danos elevados é apresentada pelo Talude 3, devendo ser tomado como a condição padrão para aplicação de contenções e medidas no restante da área, visto que não foram considerados nas simulações o nível freático ou pressões de água, partindo-se de uma condição crítica. Aplicações de forças maiores forneceriam fatores de segurança melhores, porém também podem influenciar nos custos de execução e na dificuldade de suas aplicações.

4. CONCLUSÕES

Os métodos de determinação de coesão e ângulo de atrito pelos critérios de Hoek-Brown e parâmetros de Mohr-Coulomb, assim como definição de taludes mais frágeis por visualização em campo se mostraram coerentes e similares as condições reais observadas. A subdivisão em três taludes mostrou-se adequada visto que considerou as características de similaridade de cada um destes, separados conforme suas características de resistência, exposição a fatores externos e atitudes estruturais da face do talude.

As análises cinemáticas para cada um dos taludes permitiu determinar qual situação era mais crítica e o tipo de movimento predominante, assim como realizar seus demais estudos e análises. Foi observado que o Talude 3 apresentou maior suscetividade a rupturas, devido a sua exposição alta ao intemperismo, mergulhos maiores que a inclinação do talude, e blocos aparentemente mais soltos e elevados, dificultando muitas vezes a medição das descontinuidades em campo. O Talude 2 mostrou-se mais estável que o 3 porém necessita de atenção e possíveis aplicações de medidas estabilizadoras, o Talude 1 apresentou o maior fator de segurança, observado na parte inicial do talude, com descontinuidades mais intensas e presença de vegetação em sua superfície, não apresentou blocos tão expostos e alterações elevadas do maciço.

Após as análises do talude em questão sugeriu-se a avaliação referente a aplicação de malhas metálicas atirantadas e faceamento de concreto em áreas com maiores exposições, buscando evitar possíveis rupturas e desprendimentos de blocos menores, a aplicação de drenagem superficial também seria adequada como forma de disciplinar as águas do escoamento superficial.

A aplicação das metodologias apresentadas neste estudo podem ser utilizadas na avaliação de diversos casos de instabilidade, como forma de prevenção e de planejamento de cortes a serem executados em obras de infraestrutura, em virtude dos amplos números de casos ocorrentes na região.

REFERÊNCIAS

- ALLMENDINGER, R. W. Stereonet v. 11 by Richard W. Allmendinger. p. 38, 2020.
- ALLMENDINGER, R. W.; CARDOZO, N.; FISHER, D. M. Structural Geology Algorithms. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- BELLADONA, R.; VARGAS, T. DE. Distribuição espaço-temporal das precipitações e a relevância da orografia do município de Caxias do Sul (RS). Revista Brasileira de Cartografia, v. 69, p. 607–620, 2017.
- BIENIAWSKI, Z. T. Engineering Rock Mass Classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. [s.l.] Wiley, 1989.
- BORSATTO, S. et al. Mapeamento Geológico da Área Urbana de Caxias do Sul. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, p. 83–92, 2012.
- BRESSANI, L. A.; FLORES, J. A. A.; NUNES, L. F. Desenvolvimento de Estudos de Engenharia Geotécnica / Geologia com Vistas à Geração de Relatório e Mapa Geotécnico dos Solos e Rochas Superficiais da Área Urbana da Cidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, Brasil: Contrato No 2615.000386 - 97/2004. Programa Habitar Brasil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005a.
- BRESSANI, L. A.; FLORES, J. A. A.; NUNES, L. F. Anexo A – Aspectos Geológicos. Caxias do Sul, Brasil: Contrato No 2615.000386 - 97/2004. Programa Habitar Brasil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005b.
- BRESSANI, L. A.; FLORES, J. A. A.; NUNES, L. F. Anexo B – Estudos Geotécnicos. Caxias do Sul, Brasil: Contrato No 2615.000386 - 97/2004. Programa Habitar Brasil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005c.
- CORREIO DO POVO. Queda de barreira bloqueia trânsito na ERS 122, em Farroupilha. Disponível em: <<https://www.correiodopovo.com.br/noticias/cidades/queda-de-barreira-bloqueia-trânsito-na-ers-122-em-farroupilha-1.377901>>. Acesso em: 22 jun. 2020.
- CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul Escala 1:750.000. [s.l.: s.n.].
- FREITAS, S. B. N. Caracterização Geomecânica e Classificações RMR (Bieniawsky) e SMR(Romana) de Maciços Rochosos em Taludes do Funchal. [s.l.] Dissertação de Mestrado, 2011.
- GOODMAN, R. E.; BRAY, J. W. Toppling of Rock Slopes., 1976.
- HOEK, E. Practical Rock Engineering. 2007 Ed. ed. North Vancouver: [s.n.].
- HOEK, E.; CARRANZA TORRES, C.; CORKUM, B. Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition. NARMS-TAC Conference. Anais...Toronto, Canada: 2002.
- JORNAL DO COMÉRCIO. Bloqueio da ERS-122 na serra gaúcha é mantido após novo deslizamento de rochas. Disponível em: <https://www.jornaldocomercio.com/_conteudo/geral/2019/11/712427-bloqueio-da-rs-122-na-serra-gaucha-e-mantido-devido-a-risco-de-novos-deslizamentos.html>. Acesso em: 22 jun. 2020.
- PIONEIRO. Queda de barreira em Itati, na Rota do Sol, completa um ano nesta sexta-feira. Disponível em: <<http://pioneiro.clicrbs.com.br/rs/geral/noticia/2020/05/queda-de-barreira-em-itati-na-rota-do-sol-completa-um-ano-nesta-sexta-feira-12523341.html>>. Acesso em: 22 jun. 2020a.
- PIONEIRO. Secretário garante que as pedras na Rota do Sol serão retiradas até março. Disponível em: <<http://pioneiro.clicrbs.com.br/rs/geral/noticia/2020/01/secretario-garante-que-as-pedras-na-rota-do-sol-serao-retiradas-ate-marco-12060746.html>>. Acesso em: 22 jun. 2020b.
- ROBAINA, L. E. DE S. et al. CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DOS MOVIMENTOS DE MASSA QUE OCORREM NA ÁREA URBANA DE CAXIAS DO SUL-RS. VIII Simpósio Nacional de Geomorfologia III Encontro Latino Americano de Geomorfologia I. Anais...2008
- ROCSCIENCE. Theory Manual Safety Factor Calculations - Block Toppling. [s.l.:s.n.].
- ROSSATO, M. S. Os Climas do Rio Grande do Sul: variabilidade, tendências e tipologia. Porto Alegre, Brasil: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.
- VARGAS, T. DE. RELATÓRIO DE ATIVIDADES TERMO DE COMPROMISSO PROCESSO ADMINISTRATIVO SAMAE N o 2016 / 018397. Caxias do Sul/Derby, Brasil/Reino Unido: Relatório das atividades desenvolvidas na Universidade de Derby (UK) - Projeto Newton fund. Centro Universitário da Serra Gaúcha - FSG., 2017.