



EDITORA CONHECIMENTO LIVRE



ENGENHARIA: **A MÁQUINA QUE** **CONSTRÓI O FUTURO**

VOLUME XIV

Frederico Celestino Barbosa

Engenharia: a máquina que constrói o futuro

14^a ed.

Piracanjuba-GO
Editora Conhecimento Livre
Piracanjuba-GO

14ª ed.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Barbosa, Frederico Celestino
B238E Engenharia: a máquina que constrói o futuro

/ Frederico Celestino Barbosa. – Piracanjuba-GO

Editora Conhecimento Livre, 2023

198 f.: il

DOI: 10.37423/2023.edcl762

ISBN: 978-65-5367-355-7

Modo de acesso: World Wide Web

Incluir Bibliografia

1. desenvolvimento 2. projeto 3. construção I. Barbosa, Frederico Celestino II. Título

CDU: 620

<https://doi.org/10.37423/2023.edcl762>

O conteúdo dos artigos e sua correção ortográfica são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

Capítulo 2



10.37423/230707985

ANÁLISE DO POTENCIAL DE RUPTURA PELO PROCESSO DE TOMBAMENTO FLEXURAL EM ÁREA URBANA DE CAXIAS DO SUL

Fernando Eduardo Boff

Napeia Consultoria e Projetos Ltda

Luis Felipe Faccioni

Prefeitura Municipal de Caxias do Sul

Tiago de Vargas

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Rossano Belladona

*Serviço Autônomo Municipal de Água e
Esgoto de Caxias do Sul*



Resumo: Com vistas a subsidiar medidas de contenção a serem adotadas em taludes de corte resultantes de frentes de avanço em solos e rocha para a construção civil, foram aplicadas técnicas alternativas para a determinação da estabilidade de um maciço rochoso. A área de estudo é caracterizada por rocha dacítica pertencente à Formação Serra Geral. O histórico dos esforços atuantes, a variação nos graus de alteração, as heterogeneidades no padrão de fraturamento e da composição litológica no maciço conceberam ao substrato rochoso características reológicas distintas. Devido aos diferentes graus de alteração e de geometria dos cortes, os taludes foram compartimentados em três setores distintos com as seguintes denominações: taludes 1, 2 e 3. O talude 1 é saprolítico, os taludes 2 e 3, com exposição de rocha branda a sã, foram caracterizados com base em critérios adotados para maciços rochosos. Nos materiais rochosos os parâmetros de resistência foram estabelecidos a partir do critério de Hoek (1994) generalizado a partir de dados de qualidade do maciço alcançados a partir da técnica de *scanline*, o qual permitiu a determinação do valor do RMR. Para avaliação da estabilidade do maciço aplicaram-se os métodos de análise cinemática e de equilíbrio limite de Hoek e Bray (1981). Os métodos aplicados permitiram prever a possibilidade de ruptura dos taludes 2 e 3 pelos processos de tombamento flexural e queda de blocos, determinar os parâmetros de resistência da rocha e subsidiar a projeto de contenção aplicado.

Palavras-Chave: Scanline, Tombamento Flexural, Estabilidade de Taludes, Qualidade da Rocha, Resistência ao Cisalhamento.

1. INTRODUÇÃO

O estudo de caso em análise situa-se no bairro São Caetano, zona sul do município de Caxias do Sul, RS, Brasil (Figura 1). Neste local avaliou-se a estabilidade de um talude resultante de escavação com vistas a implantação de obra destinada a abrigar um ginásio de esportes. Em termos geológicos está assentado sobre rochas da Formação Serra Geral mais especificamente no derrame vulcânico de composição dacítica, denominado localmente por Dacito Caxias. O substrato encontra-se estruturado por um conjunto de juntas regulares com disposição sub verticalizadas e sub horizontalizadas.

A distinção nos estados de alteração, de corte e drenagem do maciço redundaram na compartimentação dos taludes de corte em três setores distintos, assim caracterizados:

- Talude 1 – Solo residual (saprolito e transportado);
- Talude 2 – Rocha alterada em grau de alteração (desde muito alteradas a pouco alteradas);
- Talude 3 – Constituídos por rochas sã a pouco alterada e surgências pontuais do freático.

Enfocou-se a avaliação aos Taludes 2 e 3, uma vez que as características do maciço no Talude 1 não se aplicam as metodologias propostas neste estudo. Na *Figura 2* estão identificados em planta os trechos abrangidos pelos respectivos taludes.

Figura 1 - Localização da área em estado no município de Caxias do Sul

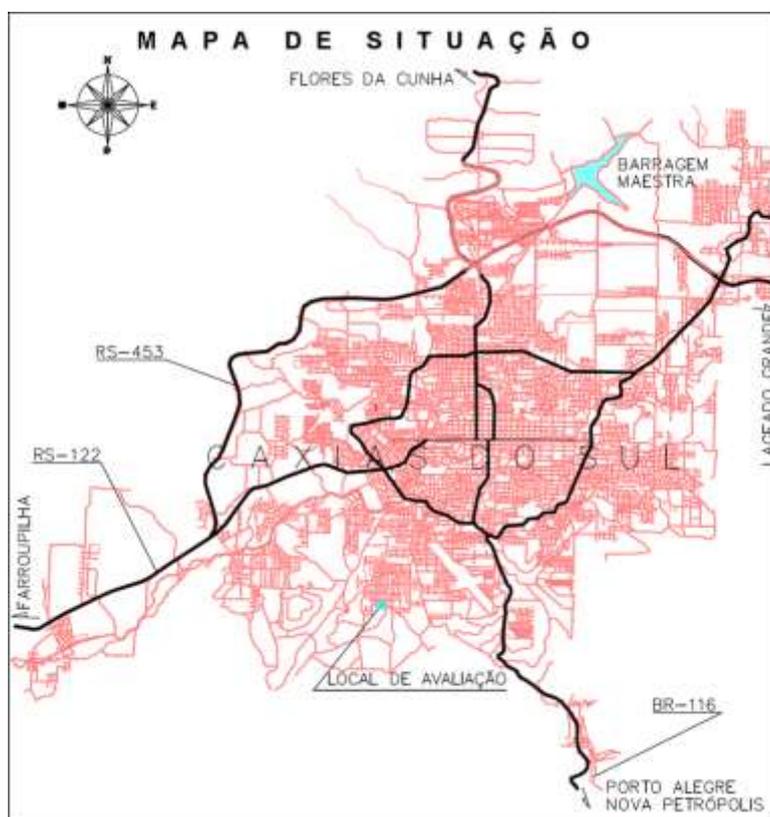


Figura 2 - Posicionamento espacial dos taludes analisados. Base cartográfica UTM, SIRGAS 2000, Zona 22J.



O aspecto in loco do maciço rochoso nos taludes de corte avaliados pode ser observado pelas figuras 3 a 6.

Figura 3 - Vista lateral da face dos Talude 2 (primeiro plano) e Talude 1 (ao fundo). O Talude 2 mostra evidências de tombamento e queda de blocos.



Figura 4 - Aspecto geral do maciço rochoso exposto na face do Talude 2.



Figura 5 - Visada para oeste da porção oeste do Talude 3 em sentido perpendicular a família de descontinuidades F2. A imagem mostra evidências de queda de blocos.



Figura 6 - Vista em sentido noroeste da face oeste do Talude 3.

2. METODOLOGIA

A metodologia de avaliação da estabilidade dos taludes foi desenvolvida em três fases distintas as quais compreenderam:

- A) Estudos Preliminares** – Em escritório foram buscadas informações quanto a estudos já realizados na região, imagens de satélite, cartas topográficas, levantamentos planialtimétricos atualizados. Nesta fase também foram definidas as estratégias de avaliação incluindo a escolha das áreas críticas (taludes instáveis) e a preparação de planilhas de campo.
- B) Em Campo** - O método de avaliação da estabilidade do talude selecionado consistiu no levantamento sistemático das características da rocha e das discontinuidades do maciço. A aquisição de dados foi realizada através de planilha específica adotada pelo IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas). O conjunto de observações de natureza estrutural e geométrica extraídos da superfície do maciço rochoso e das discontinuidades estão relacionados no **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Cada trecho avaliado foi georreferenciado e posicionado em planta planialtimétrica atualizada. A determinação das orientações dos planos das estruturas (descontinuidades) da rocha e das faces dos taludes foi efetuada por meio de bússola modelo *clar* sendo adotado método homônimo para registro das orientações. Os demais parâmetros foram determinados mediante inspeção visual in loco e dimensionados com equipamentos convencionais de medição (trena e régua milimetrada). A estimativa da resistência a ruptura foi estimada a partir de índices de campo.

Quadro 1 - Propriedades características da rocha e das discontinuidades avaliadas a partir do maciço rochoso.

Características da rocha	Resistencia da rocha intacta
	Estado de alteração da rocha
	Tipos litológicos presentes
Características das discontinuidades	Tipo de estrutura
	Índice de qualidade da rocha (RQD)
	Estado de alteração das paredes da rocha
	Orientação
	Espaçamento
	Persistência
	Abertura
	Preenchimento
	Exsudação d'água
	Microrrugosidade
	Macrorrugosidade
	Amplitude de onda
	Comprimento de onda

C) Tratamento de Dados - Várias das informações coletadas em campo foram identificadas por meio de índices classificatórios. Posteriormente por intermédio de programas computacionais processou-se o tratamento estatístico dos dados. A orientação espacial das relações entre as atitudes das estruturas geológicas presentes no maciço e do plano do talude foi representada em estereogramas de Schmidt-Lambert, através do programa DIPS versão 5.1. A ocorrência relativa das propriedades de interesse foi avaliada por meio de histogramas de frequência no programa Excel 2007. O estudo da distribuição espacial das discontinuidades compreendeu a definição de sistemas de famílias. Entende-se por família como um conjunto de discontinuidades que possuem estreita similaridade quanto aos critérios de orientação e origem. Para avaliação da distribuição espacial das discontinuidades e distinção das famílias com auxílio de estereogramas foi obedecida a seguinte rotina de procedimentos:

- Plotagem da orientação dos planos das discontinuidades e talude analisado;
- Representação dos pólos das discontinuidades;
- Delineamento das curvas de isofrequências para tipificar as famílias de discontinuidades;
- Determinação dos planos preferenciais ou famílias de discontinuidades, pela concentração máxima dos pólos.

A estabilidade dos taludes por tombamento avaliada a partir do modelo numérico de Goodman e Bray (1976), por meio do Software RocTopple V.2 da Rocscience.

2.1 QUALIDADE DO MACIÇO

A qualidade do maciço foi determinada para os distintos domínios (Taludes 2 e 3) a partir de dados coletados in loco, técnicas expeditas e de acordo com a classificação geomecânica de Bieniawski (1989) denominada Rock Mass Rating (RMR).

A classificação geomecânica é baseada no princípio da atribuição de pesos aos seis parâmetros que Bieniawski considerou contribuir mais significativamente para o comportamento dos maciços rochosos, tendo em atenção especial o caso das obras subterrâneas. O somatório dos pesos atribuídos a cada um destes parâmetros constitui um índice, usualmente designado por RMR, ao qual corresponde a uma das cinco classes de qualidade de maciços, consideradas pelo autor. Os parâmetros utilizados são a Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta, o RQD (*“Rock Quality Designation”*), o espaçamento das descontinuidades, a condição das descontinuidades, a influência da água e a orientação das descontinuidades.

Os índices, pesos e classificação atribuídos para a classificação geomecânica e conforme a metodologia RMR de Bieniawski estão contidos no Quadro 1.

Quadro 1 - Classificação geral do maciço no talude conforme classificação geomecânica de Bieniawski (1989)

Item	Horizonte		Rocha muito alterada		Rocha alterada	
	Parâmetro		Índice	Pesos	Índice	Pesos
1	Resistência da rocha intacta (Mpa)		12,5	2	100	12
2	RQD		55,49	13	78,42	17
3	Espaçamento (m)		0,19	8	0,72	15
4	Condição das descontinuidades	Comprimento (m)	1-2	1	3-10	2
		Abertura (mm)	0,1-1	3	<0,1	5
		Rugosidade	Ligeiramente rugosa	3	Ligeiramente rugosa	3
		Preenchimento	duro	4	Sem	6
		Alteração	Muito alterada	1	Ligeiramente alterada	5
5	Presença de água		Ligeiramente úmido	10	Ligeiramente úmido	10
6	Orientação das descontinuidades		Favorável	-25	Favorável	-25
Somatório dos pesos (Peso global)			-	23	-	50
Classe			-	IV	-	III

Para estimativa da resistência do maciço rochoso utilizou-se a classificação de Piteau (1970), que desenvolveu uma Tabela onde se estima a resistência à compressão uniaxial aproximada do material rochoso, recorrendo a técnicas expeditas, prescindindo de ensaios laboratoriais (Quadro 2).

Quadro 2- Estimativa da resistência à ruptura por compressão uniaxial do material rochoso a partir de índices de campo (Modificado de ISRM (1981)).

Classe	Descrição	Identificação de campo	Aproximação ao intervalo de resistência a compressão simples (Mpa)
R0	Rocha extremamente branda	Se pode marcar com a unha	0,25-1,0
R1	Rocha muito branda	A rocha se esmigalha ao golpe da ponta do martelo. Com uma navalha se risca facilmente.	1,0-5,0
R2	Rocha branda	Se risca com dificuldade com uma navalha. Ao se golpear com a ponta do martelo se produz pequenas marcas.	5,0-25
R3	Rocha moderadamente dura	Não pode ser riscado com a navalha. Pode fraturar-se com um golpe forte do martelo.	25-50
R4	Rocha dura	Se requer mais de um golpe com o martelo para fraturá-la.	50-100
R5	Rocha muito dura	Se requer muitos golpes com o martelo para fraturá-la.	100-250
R6	Rocha extremamente dura	Ao golpear-se com o martelo somente saltam fagulhas	>250

Para o RQD aplicou-se a correlação proposta por Palmström (1982):

$$RQD = 115 - 3,3.J_v \quad \text{eq.1}$$

3. DETERMINAÇÃO DOS PARAMETROS DE RESISTÊNCIA

Para a determinação dos parâmetros de resistência do maciço (ϕ e c) adotou-se o critério de Hoek (1994) generalizado que é definido pela expressão:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \cdot \left(m_b \cdot \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^\alpha \quad \text{eq.2}$$

Onde:

σ_1 e σ_3 são as tensões principais maior e menor de ruptura;

σ_{ci} é a resistência a compressão simples da rocha intacta. O valor de resistência foi estimado a partir de índices de campo (ISRM, 1981);

m_b e s são constantes adimensionais que dependem das propriedades do maciço rochoso, do tipo de rocha e da frequência e características das discontinuidades.

Os valores de m_b , s e α são obtidos a partir das expressões:

$$m_b = m_i \cdot \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \quad \text{eq.3}$$

Onde,

m_i =Constante da rocha intacta;

GSI = Índice de resistência geológica;

D = fator de perturbação

As constantes s e α podem ser deduzidas a partir das seguintes expressões:

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \quad \text{eq.4}$$

$$\alpha = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \cdot \left(e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}}\right) \quad \text{eq.5}$$

De acordo com Hoek e Brown (1997), para maciços rochosos competentes ($GSI > 25$, $RMR > 23$), o valor de GSI pode ser estimado a partir do valor do Rock Mass Rating RMR como,

$$GSI = RMR_{89} - 5 \quad \text{eq.6}$$

Os índices de ângulo de atrito (ϕ) e de coesão (c) podem ser calculados através do critério entre Hoek-Brown e Mohr-Coulomb representados a partir das seguintes expressões (Hoek, 1990):

$$\phi' = \text{sen}^{-1} \left[\frac{6 \cdot a \cdot m_b \cdot (s + m_b \cdot \sigma'_{3n})^{\alpha-1}}{2 \cdot (1+a) \cdot (2+a) + 6 \cdot a \cdot m_b \cdot (s + m_b \cdot \sigma'_{3n})^{\alpha-1}} \right] \quad \text{eq.7}$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci} \cdot [(1+2a) \cdot s + (1-a) \cdot m_b \cdot \sigma'_{3n}] \cdot (s + m_b \cdot \sigma'_{3n})^{\alpha-1}}{(1+a) \cdot (2+a) \cdot \sqrt{1 + \frac{6 \cdot a \cdot m_b \cdot (s + m_b \cdot \sigma'_{3n})^{\alpha-1}}{(1+a) \cdot (2+a)}}} \quad \text{eq.8}$$

Sendo:

$$\sigma_{3n} = \frac{\sigma'_{3max}}{\sigma_c} \quad \text{eq.9}$$

Onde,

$$\frac{\sigma'_{3max}}{\sigma'_{cm}} = 0,72 \cdot \left(\frac{\sigma'_{cm}}{\gamma \cdot H}\right)^{-0,91} \quad \text{eq.10}$$

Os índices utilizados para o cálculo e os resultados alcançados estão relacionados na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades do maciço rochoso determinados para os taludes 2 e 3

Propriedade	Unidade	Talude 2	Talude 3
peso específico	MN/m ³	0,0224	0,0252
altura dos taludes	m	10	11
RMR	-	23	50
m_i	-	17	17
D	-	0,7	0,7
GSI	-	18	45
m_b	-	0,1878	0,8280
s	-	$6,9 \times 10^{-6}$	0,000345
α	-	0,55	0,51

σ_{ci}	MPa	12,5	100
σ_{cm}	MPa	0,0181	1,7423
σ_{im}	MPa	-0,00046	-0,04171
σ_c	MPa	12,5	100
σ_{3max}	MPa	0,12862	0,23532
σ_{3n}	MPa	0,01029	0,00235
ϕ	-	0,5658	0,8690
ϕ°	°	34,46	60,34
c'	MPa	0,4061	0,2228
c'	KPa	406,1	222,8

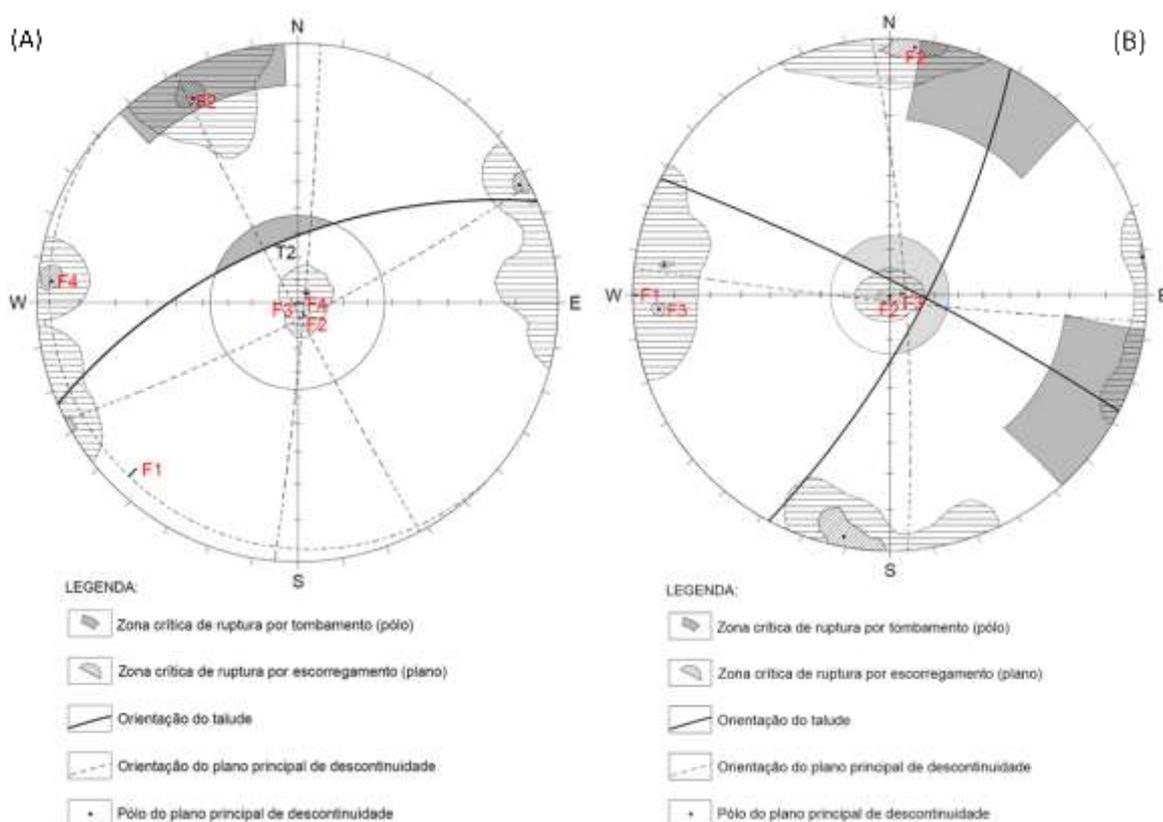
4. AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE

4.1 ANÁLISE CINEMÁTICA

Para determinação dos mecanismos de ruptura do talude em meio fraturado (circular planar, em cunha ou tombamento) utilizou-se inicialmente o método da análise cinemática, através da rede estereográfica. A análise cinemática, realizada com o software Dips V.5.1 da Rocscience, permitiu identificar em cada seção de talude o potencial de ruptura por tombamento e escorregamento (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

Com base na aplicação deste método foram reconhecidas duas possibilidades de ruptura:

- 1) Por tombamento no talude 2 a partir de corte desfavorável em relação a disposição do conjunto de descontinuidades da família 2 (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**(A)).
- 2) Condições restritas ao tombamento no talude 3 condicionada pelo corte desfavorável nas famílias 2 e 3 (**Erro! Fonte de referência não encontrada.** (B)).

Figura 7 - Modelo de ruptura por tombamento e deslizamento para o Talude 2(A) e 3(B).

4.2 EQUILÍBRIO LIMITE

A análise da estabilidade também pode ser estabelecida com a aplicação do princípio de equilíbrio limite de Hoek e Bray (1981). Goodman e Bray (1976) propuseram que a condição cinemática favorável para tombamento flexural ocorre quando a equação 11 for satisfeita, onde θ é o ângulo da face do talude, ϕ_j e δ são o ângulo de atrito e o mergulho das descontinuidades, respectivamente.

$$\theta \geq 90^\circ + \phi_j - \delta \quad \text{eq.11}$$

O fator de segurança baseado na condição cinemática proposta por Goodman & Bray (1976) pode ser pela equação proposta por Hudson e Harrison (1997):

$$FS = \frac{\tan \phi_j}{\tan(\theta + \delta - 90)} \quad \text{eq.12}$$

O fator de segurança pode ser determinado por essa metodologia (Hudson e Harrison, 1997), mas esse método fornece apenas uma indicação de possibilidade de movimento flexural e não considera os mecanismos que controlam o escorregamento entre as camadas (Adhikary et al., 1997).

Aydan e Kawamoto (1992) sugeriram uma metodologia de cálculo por equilíbrio limite para taludes susceptíveis a tombamento flexural, onde o fator de segurança pode ser obtido por erros e tentativas ($\theta > 90^\circ + \phi_j - \delta$).

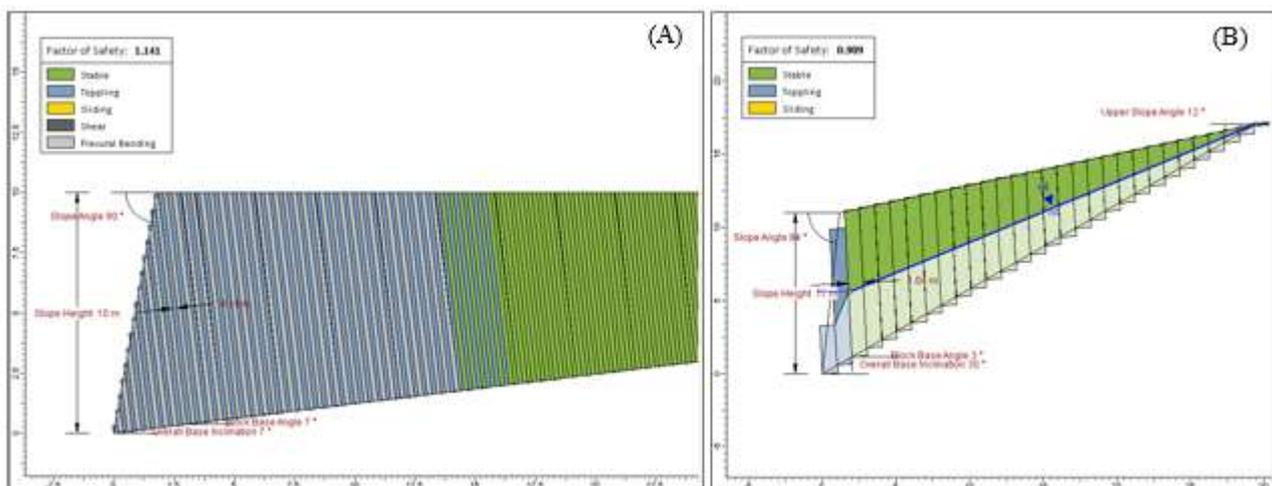
Os fatores de segurança para tombamento flexural dos taludes 2 e 3 foram avaliados a partir do modelo numérico de Goodman e Bray (1976), por meio do Software RocTopple V.2.0 da Rocscience. Os resultados obtidos para os taludes 2 e 3 e representados nas Figura 8A e 8B mostraram possibilidades cinemáticas para o movimento flexural.

4.3 DETERMINAÇÃO DO FATOR DE SEGURANÇA

No talude 2 o resultado do fator de segurança por tombamento flexural do maciço, obtido pelo critério de Hoek e Bray, equivale a 1,141, o que se traduz numa condição de segurança mínima a ruptura. A simulação obtida para o talude 3 considerando a situação mais desfavorável resultou num índice para o fator de segurança de 0,909 assinalando um potencial de ruptura por tombamento de bloco. As Figura 8 (A) e (B) ilustram respectivamente as análises bidimensionais ao longo de seções esquemáticas dos taludes 2 (A) e 3 (B). Nestas ilustrações estão assinalados os intervalos (em azul) com risco potencial de tombamento.

O padrão de espaçamento e orientação das discontinuidades sub-horizontais por vezes com inclinação desfavorável a vertente do talude condiciona, também a atuação de instabilidade por queda de blocos.

Figura 8 - Estimativa do FS no talude 2 para tombamento flexural considerando o plano de deformação obtido pelo modelo numérico (A). Estimativa do FS no talude 3 para tombamento de bloco considerando o plano de deformação obtido pelo modelo numérico (B).



5. CONCLUSÕES

As técnicas e métodos aplicados a caracterização e avaliação da estabilidade dos taludes de corte no maciço rochoso investigado suscitaram ao alcance das seguintes constatações:

- A aplicação pelo método de análise cinemática evidenciou um risco a instabilidade por tombamento do plano de descontinuidade da família F2 no talude 2, assim como uma condição iminente de ruptura no talude 3 em alguns planos das famílias F2 e F3;
- A determinação dos parâmetros de resistência do maciço mesmo sem a aplicação de ensaios laboratoriais (tais como de compressão simples e de resistência ao cisalhamento) demonstraram em função dos resultados um grau de aproximação satisfatório para avaliação estabilidade dos taludes.
- Permitiram levantamento detalhado das propriedades do maciço e forneceram subsídios a escolha e elaboração do projeto de contenção mais adequado a ser adotado;
- Os fatores de segurança para tombamento flexural estabelecidos a partir do modelo numérico de Goodman e Bray (1976), por meio do Software RocTopple V.2 da Rocscience, conferiram índices respectivamente de 1,141 para tombamento flexural e de 0,909 para tombamento de bloco aos planos de maior instabilidade cinemática dos taludes 2 e 3, atestando, portanto, a condição de instabilidade do maciço;
- Os métodos aplicados se mostram apropriados a processos de instabilidade do tipo tombamento associado a queda de blocos, os quais apresentam incidência recorrente em taludes de corte nos maciços rochosos de origem vulcânica com comportamento e características peculiares a região de serra gaúcha e podem também ser aplicados como forma de controle preventivo de escavações em rocha.

REFERÊNCIAS

- ADHIKARY, D.P., DYSKIN, A.V., JEWELL, R.J. et al. A study of the mechanism of flexural toppling failure of rock slopes. *Rock Mech Rock Engng* 30, 75–93 (1997) doi:10.1007/BF01020126.
- AYDAN, O. AND KAWAMOTO, T. The Stability of Slopes and Underground Openings Against Flexural Toppling and Their Stabilisation. *Rock Mech. Rock Engng.* (1992) 25 (3), 143—165.
- GOODMAN, R.E. AND BRAY. J.W. (1976) Toppling of Rock Slopes. *Proceedings of the Specialty Conference on Rock Engineering for Foundations and Slopes*, 2, 201-234.
- ISRM. Rock characterization. Testing and monitoring. ISRM suggested methods. Brown, E. T. Ed. Commission on testing and monitoring. International Society for Rock Mechanics. Pergamon Press. 1981.
- HOEK, E. AND BROWN, E.T. The Hoek-Brown failure criterion - a 1988 update. IN: *PROC. 15TH CANADIAN ROCK MECH. SYMP.* (ed. J.C. Curran), 1988. 31-38. Toronto, Dept. Civil Engineering, University of Toronto.
- Hoek, E., and Brown, E.T., 1997, Practical estimates of rock mass strength: *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, v. 34, p. 1165-1186.
- HOEK, E. Estimating Mohr-Coulomb friction and cohesion values from the Hoek-Brown failure criterion. *Intl. J. Rock Mech. & Mining Sci. & Geomechanics Abstracts*. 12 (3), 1990. 227-229.
- HUDSON, J. A. AND HARRISON, J. P. (1997), *Engineering rock Mechanics: An introduction to the principles*. Published by Elsevier Science Ltd. 444pp.
- PALMSTRÖM, A. The volumetric joint count - a useful and simple measure of the degree of jointing. IN: *PROC. IV INT. CONGR. IAEG*, New Delhi, 1982. pp. 221-228.