

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

Fernando Eduardo Boff¹; Luis Felipe Faccioni²; Tiago De Vargas³; Rossano Belladona⁴

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.

Abstract – Aiming aiding containment measures in soil and rock slope cuts in construction sites, alternative techniques were applied in order to determine rock stability. The studied area is characterized by dacitic rock belonging to the Serra Geral Formation. Stresses history, variation in the alteration degrees, the heterogeneities in the fracture patterns and in the lithological composition produced distinct rock rheological characteristics. Due to different alteration degrees and cut geometries, the slopes were separated into three sections, so called: slopes 1, 2 and 3. Slope 1 is saprolite, while slopes 2 and 3, with altered to intact rock, were characterized based upon rock massif criteria. On rocky materials, resistance parameters were established upon Hoek's (1994) generalized from rock quality data obtained from scanline technic, allowing RMR value determination. Rock stability was evaluated with the cinematic analysis and Hoek and Bray (1981) limit equilibrium. These methods allowed predicting the rupture possibility of slopes 2 and 3 by flexural tipping and block falling processes, determining rock resistance parameter and helping the applied containment project.

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

¹ Geol. MSc, Napeia Consultoria e Projetos Ltda: Caxias do Sul – RS, (54) 3223.9188, fernando.boff@napeia.com.br

² Geol., Prefeitura Municipal de Caxias do Sul, (54) 3218.6000, lfaccioni@caxias.rs.gov.br

³ Geol., PhD, Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto, (54) 3220.8600, tvargas@samaecaxias.com.br

⁴ Eng.º Ambiental, Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto, (54) 3220.8600, rbelladona@samaecaxias.com.br

1. INTRODUÇÃO

O estudo de caso em análise situa-se no bairro São Caetano, região sul do município de Caxias do Sul, RS, Brasil. 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 subverticalizadas e subhorizontalizadas.

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 a que as características do maciço no Talude 1 não se aplicam as metodologias propostas neste estudo. Na Figura 1 estão identificados em planta os trechos abrangidos pelos respectivos taludes.

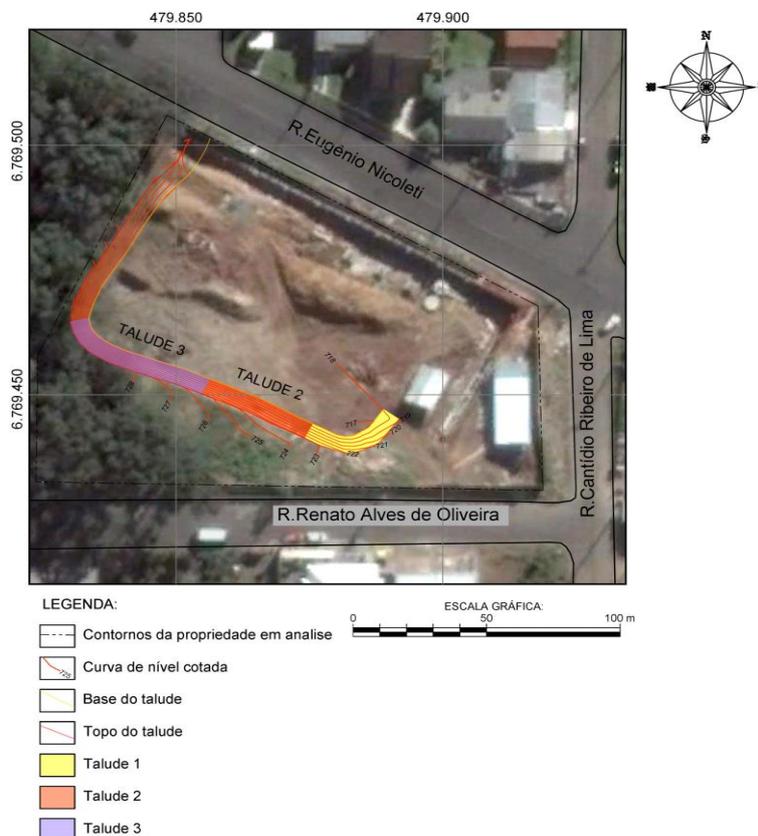


Figura 1 - Posicionamento espacial dos taludes analisados. Base cartográfica UTM, Sirgas 2000, Zona 22J.

2. 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, RQD ("Rock Quality Designation"), Espaçamento das descontinuidades, Condição das descontinuidades, Influência da água e Orientação das descontinuidades.

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:

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

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 descontinuidades.

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

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

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:

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

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

Para $GSI > 25$ (maciços de moderada a muito boa qualidade) este índice pode ser obtido a partir do RMR, em cujo caso deve ser atribuído um valor de 15 para as condições de água do maciço e um valor de 0 ao parâmetro de ajuste para a orientação das descontinuidades, mediante a correlação:

$$GSI = RMR_{89} - 5$$

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):

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

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

Sendo:

$$\sigma_{3n} = \frac{\sigma'_{3max}}{\sigma_c}$$

Onde,

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

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	Talude 2	Talude 3	Propriedade	Talude 2	Talude 3
peso específico (MN/m ³)	0,0224	0,02518	σ_{cm}	0,0181	14,0758
altura dos taludes (m)	10	11	σ_{im}	-0,00046	-0,35231
RMR	23	50	σ_c	12,5	100
mi	17	17	σ_{3max}	0,12862	0,284003
D	0,7	0,7	σ_{3n}	0,01029	0,00284
GSI	18	45	ϕ	0,5658	0,922545
mb	0,1878	1,2176	ϕ°	34,46	67,30107
s	6×10^{-6}	0,019979601	c' (Mpa)	0,4061	1,303121
a	0,55	0,501071059	c' (Kpa)	406,1	1303,121
σ_{ci}	12,5	100			

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 (fig. 2).

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 (Figura 2(A)).
- 2) Condições restritas ao tombamento no talude 3 condicionada pelo corte desfavorável nas famílias 2 e 3 (Figura 2(B)).

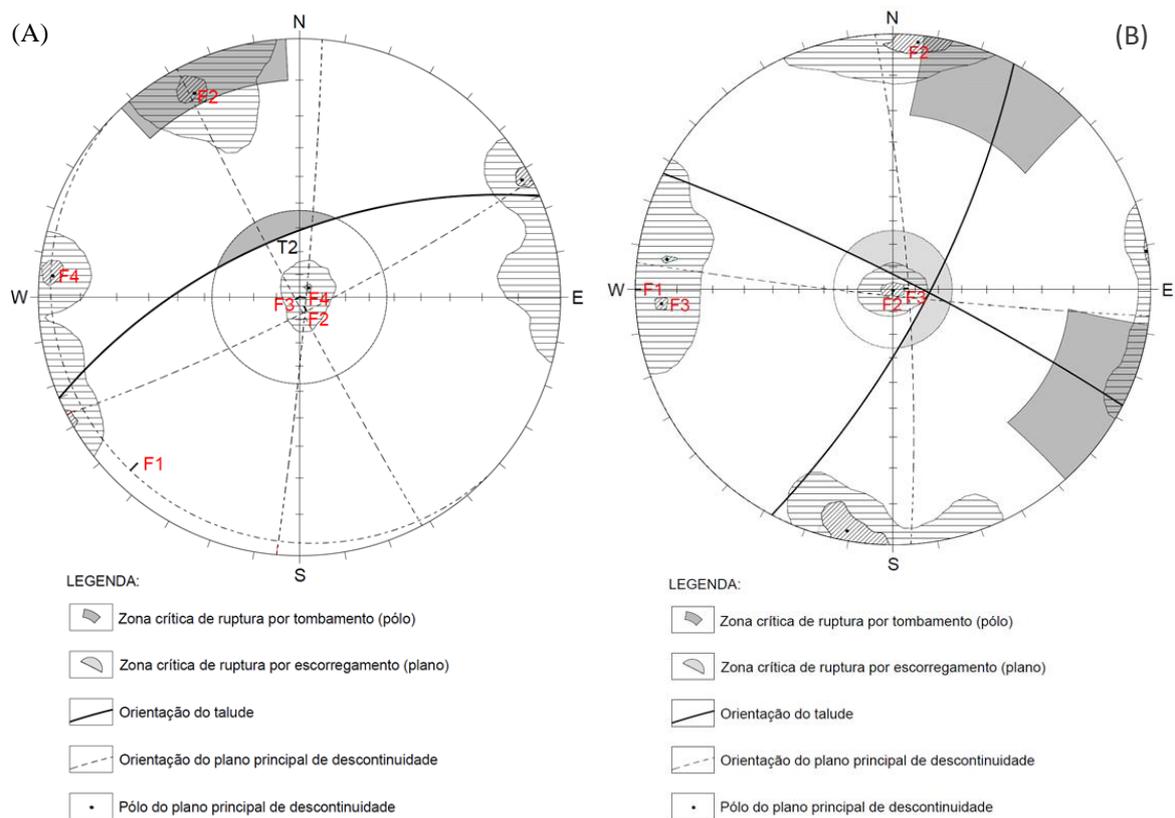


Figura 1 - Modelo de ruptura por tombamento e deslizamento para o Talude 2(A) e 3(B).

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 1 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. 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 1, 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 2A e 3B 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 2 (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 descontinuidades sub-horizontais por vezes com inclinação desfavorável a vertente do talude condiciona, também a atuação de instabilidade por queda de blocos.

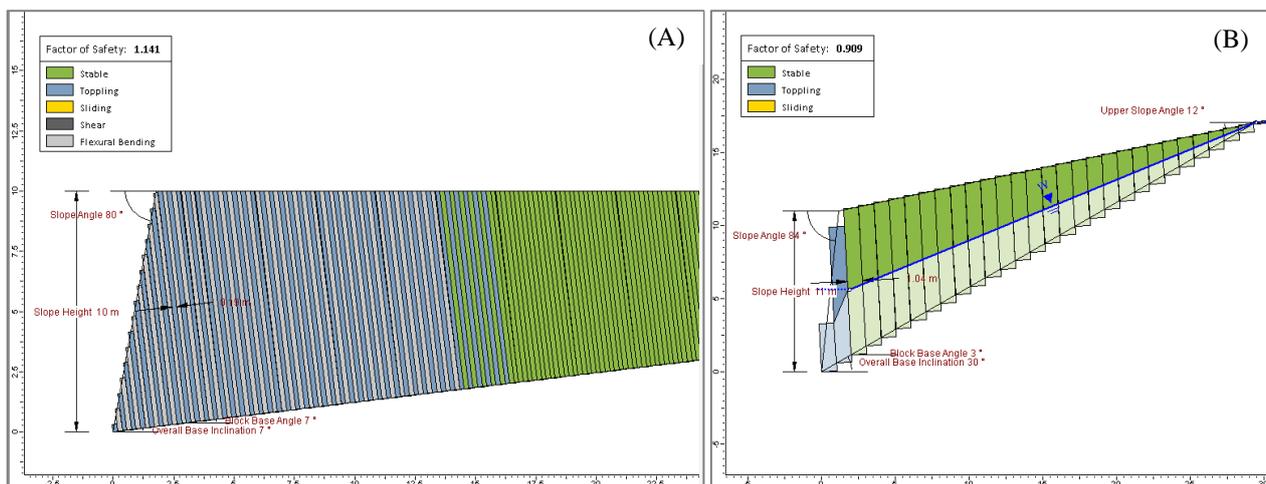


Figura 2 - Estimativa do FS no talude 2 para tombamento flexural considerando o plano de deformação obtido pelo modelo numérico (A). Estimativa do FS no talude 3 para tombamento de bloco considerando o plano de deformação obtido pelo modelo numérico (B).

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.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio institucional da Prefeitura Municipal de Caxias do Sul e do Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto (SAMAE).

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. 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.