

Mecanismos de Evolução de Voçorocas e Quantificação dos Impactos Associados Através de Modelagem Matemática: Estudo de Caso da Voçoroca Mangue Seco, São Gonçalo do Bação (MG)

Péterson Gonçalves de Lima

Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, peterssom@yahoo.com.br

Luis de Almeida Prado Bacellar

Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, bacellar@degeo.ufop.br

RESUMO: O Complexo Metamórfico do Bação, localizado na região centro-sul do Quadrilátero Ferrífero, se destaca por ser uma área intensamente afetada por voçorocas, uma vez que possui fatores geológicos, geomorfológicos, climáticos e antrópicos bastante favoráveis. A voçoroca Mangue Seco, foco desse estudo, encontra-se ativa e situa-se no município de São Gonçalo do Bação, distrito de Itabirito (MG). Nesse sentido, foi elaborado um modelo matemático por elementos finitos da zona saturada e não saturada em regime permanente e transitório da área de influência desta voçoroca com o programa Feflow 6.1. Os resultados foram calibrados com dados de monitoramento piezométrico durante um ano hidrológico de 05 piezômetros de Casagrande instalados nas proximidades da voçoroca e também com os dados de recarga da área de estudo e vazão da drenagem interna da voçoroca. Os resultados fornecidos pelo modelo indicaram uma redução do fluxo de base em regiões voçorocadas (redução de 25,1% do fluxo de base para duas voçorocas ocupando juntas em torno de 18,4% do modelo) que é compatível com avaliações anteriores, demonstrando o impacto no regime hídrico. Em escala regional esta perda de água é muito significativa, especialmente durante a estação seca. Sabe-se que voçorocas ativas da região se desenvolvem muitas vezes mais por movimentos de massa, especialmente escorregamentos rotacionais, que propriamente por processos de erosão hídrica e portanto realizou-se também simulações de fluxo desenvolvidas no programa SEEP/W acopladas à análises de estabilidade de taludes, desenvolvidas com o programa SLOPE/W a partir de premissas encontradas com a simulação 3D anterior. As análises de estabilidade demonstraram uma correlação entre a elevação do lençol freático e a redução dos fatores de segurança dos taludes (podendo causar escorregamentos rotacionais) e posteriormente o aumento dos fatores de segurança e da resistência do solo em virtude do seu processo de secagem, mecanismo também já bem caracterizado na literatura correlata.

PALAVRAS-CHAVE: Métodos Numéricos, Feflow, Fluxos Hídricos, Voçorocas, Taludes, Análise de Estabilidade.

1 INTRODUÇÃO

Erosão é o processo de desagregação e remoção de partículas do solo ou fragmentos e partículas de rochas, pela ação combinada da gravidade com a água, vento, gelo e organismos (plantas e animais). Em geral, distinguem-se duas formas de erosão: natural ou geológica (que se desenvolve em condições de equilíbrio com a

formação do solo) e acelerada ou antrópica (cuja intensidade é superior à formação do solo, não permitindo sua recuperação natural) (Salomão e Iwasa, 1995).

Dentro do processo de erosão destacam-se as voçorocas, que proporcionam grave situação de risco geológico, além de impactar tanto o meio ambiente quanto o sócio-econômico, com a perda de áreas úteis.

O Complexo Metamórfico do Bação, localizado na região centro-sul do Quadrilátero Ferrífero, é uma área intensamente afetada por voçorocas, uma vez que possui fatores geológicos, geomorfológicos e climáticos bastante favoráveis ao desenvolvimento dessas feições. Os aspectos naturais da área, auxiliados pela intervenção antrópica, propiciaram o desenvolvimento de voçorocas com grandes dimensões, algumas já estabilizadas e outras ainda ativas (Sobreira, 1998). Estudos na região têm demonstrado que os movimentos de massa, especialmente por escorregamentos rotacionais, provavelmente favorecidos pela exfiltração do lençol freático na base dos taludes constituem um importante mecanismo de mobilização e transporte de sedimentos das voçorocas da área, bem como seu avanço (Bacellar, 2000; Futai, 2002; Futai *et.al*, 2005; Drumond, 2006).

Baseando-se em extensivo monitoramento piezométrico e hidrossedimentológico, Drumond (2006) verificou que na voçoroca denominada Mangue Seco, há um sincronismo entre a instabilização dos taludes da voçoroca, a produção de sedimentos e a elevação máxima do nível d'água subterrâneo. Isto ocorre em decorrência da recarga, que tem seu auge alguns meses após o término do período chuvoso, uma vez que a percolação pela zona não saturada é lenta.

Nesse contexto, pretende-se estudar esta voçoroca através de modelagens hidrogeológicas e geotécnicas com o objetivo de caracterizar o impacto de voçorocas no regime hídrico local e a influência deste nos seus mecanismos de evolução, especialmente por escorregamentos rotacionais.

Acredita-se que este tipo de estudo possa futuramente auxiliar em projetos de controle destas feições erosivas.

1.1 Área de Estudo

A voçoroca Mangue Seco está localizada no município de São Gonçalo do Bação, distrito de Itabirito (MG) à cerca de 60 km de Belo Horizonte.

O Complexo Metamórfico do Bação situa-se na porção central do Quadrilátero Ferrífero e representa o embasamento cristalino granítico-gnáissico da região (Santos e Sobreira, 2010). O

embasamento aflora em uma estrutura dômica circundada por rochas vulcanossedimentares datadas do período pré-cambriano do Supergrupo Rio das Velhas e pela sequência de rochas do Supergrupo Minas (Figura 1) (Dorr, 1969; Gomes, 1986).

O talude onde se encontra a voçoroca apresenta perfil relativamente retilíneo e exibe declividade média de 14% . No talude o perfil pedológico é relativamente simples, composto por 3 horizontes pedológicos que se desenvolvem sobre um gnaíse bandado (Drumond, 2006): horizonte superficial (A), com 0,40 m de espessura média e aspecto granular; horizonte B, permeável, com estrutura em blocos, resistente à erosão e com espessura que varia de 2,80 m na alta vertente e se adelgaça rumo à baixa vertente, podendo até desaparecer na transição para solos aluviais, nas proximidades do canal fluvial; horizonte C (saprolito), que chega a ultrapassar os 35,0 m de espessura na alta vertente atingindo cerca de 5,0 m na baixa vertente, sendo bastante friável e erodível (Drumond, 2006; Chaves, 2011).

Conforme indicam estudos anteriores (Drumond, 2006), o aquífero na região é constituído por um sistema formado por um aquífero intergranular na base do saprolito sobreposto a um aquífero fraturado no maciço rochoso.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Modelo Hidrogeológico Conceitual

Com base em trabalhos prévios (Sobreira, 1998; Bacellar, 2000 e outros) e, especialmente no estudo detalhado de Drumond (2006), foram elaborados dois modelos hidrogeológicos conceituais do talude, um sem e outro com a voçoroca, denominados modelo I e II, respectivamente.

Como o horizonte A é muito delgado, este pode ser tratado conjuntamente com o horizonte B, e o modelo conceitual final fica constituído por 03 unidades: A/B, C e rocha sã (Tabela 1).

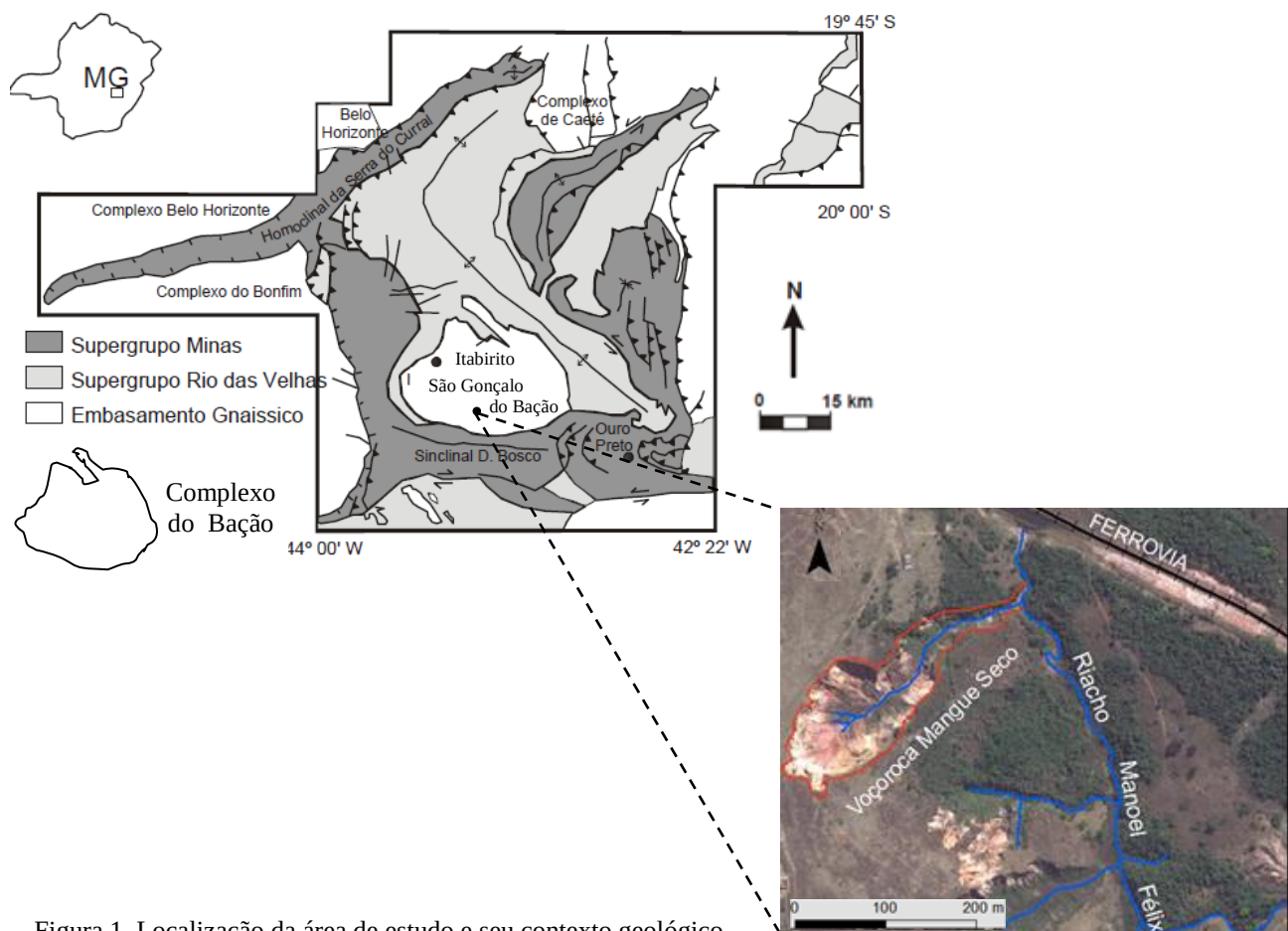


Figura 1. Localização da área de estudo e seu contexto geológico (Adaptado de Door, 1969 e Drumond, 2006)

A superfície topográfica e a distribuição espacial dos horizontes pedológicos foram baseados em sondagens e na topografia de detalhe (1:25.000) levantada por Drumond (2006) e digitalizada e interpolada por Chaves (2011).

Os valores de condutividade hidráulica para os horizontes pedológicos foram tomados de “slug tests” feitos na região (Tabela 1).

Tabela 1. Unidades do modelo com as condutividades hidráulicas (Adaptado de Bacellar, 2000).

Unidade	Horizonte pedológico	Condutividade hidráulica (m/s)
1	A/B (solo laterítico)	$3,1 \cdot 10^{-4} - 5,4 \cdot 10^{-5}$
2	C (saprolito)	$2,3 \cdot 10^{-5} - 3,7 \cdot 10^{-6}$
3	Rocha (embasamento cristalino)	Impermeável ($\approx 10^{-8}$)

Como na área da voçoroca o gnaiss é pouco fraturado, seu maciço pode ser considerado praticamente impermeável em relação ao sapro-

lito subjacente. Por outro lado, o solo laterítico localizado na parte superior do perfil pedológico constitui a unidade de maior condutividade hidráulica na área. O coeficiente de armazenamento para as modelagens em fluxo transitório foi tomado a partir de trabalhos prévios (e.g.: Drumond, 2006).

Como a declividade média do talude não é alta e como o riacho Manoel Félix, para o qual o canal da voçoroca drena, encontra-se muito encaixado, toda a superfície topográfica deste modelo pode ser considerada área de recarga.

Drumond (2006) estimou a recarga local em 183,6 mm/ano, com base em dados de variação de nível d'água nos piezômetros. A fronteira basal, no contato do saprolito com a rocha, foi tratada como praticamente impermeável, pelos motivos discutidos acima. As fronteiras à montante e laterais foram consideradas também impermeáveis, delimitadas por divisores topográficos superficiais, assumindo-se que os divisores subterrâneos de água coincidem com os superficiais, pressuposto razoável para a

região. A fronteira junto ao riacho Manoel Félix foi assumida como tipo 3 (do tipo Cauchy).

O modelo conceitual II se diferencia pela remoção do solo pela voçoroca, e com água subterrânea aflorando no sopé dos taludes ativos das voçorocas. Estes sopés de taludes ativos foram tratados como fronteira do tipo 3, com vazão dependente da carga (drenos). A parte interna da voçoroca (área sem recarga), que atualmente se encontra no nível da rocha sã, atua como zona com predomínio de escoamento superficial, não sendo, portanto, incluída neste modelo hidrogeológico.

2.2 Modelagem de Fluxo

Criou-se um modelo matemático no programa Feflow 6.1 da DHI-WASY, e efetuou-se a modelagem inicialmente em regime permanente e posteriormente em regime transitório, utilizando para a calibração do modelo, dados de monitoramento piezométrico durante um ano hidrológico, de 05 piezômetros de Casagrande instalados no entorno da voçoroca e também dados de recarga e de vazão da drenagem interna da voçoroca obtidos por Drumond (2006). O modelo construído apresenta 07 camadas, 01 para o horizonte A/B, 05 para o horizonte C e 01 para a rocha sã.

Baseando-se nas informações das simulações de fluxo hídrico em 3D, foi desenvolvida uma análise 2D de fluxo no SEEP/W, em regime permanente, para 02 cenários: anterior à recarga na área, ao final do período seco (constituindo o nível d'água mais baixo) e com o nível de água mais alto, no auge da recarga, ao final do período chuvoso.

Para a análise de fluxo 2D escolheu-se como perfil típico, um segmento da encosta da voçoroca Mangue Seco com 2 piezômetros que serviriam como fonte de informação para a observação da oscilação do nível d'água (NA).

A análise de fluxo 2D serviu de base para as simulações de estabilidade a escorregamento rotacional pelo método de Morgenstein-Price com análise de fluxo acoplada, realizadas com o SLOPE/W. Utilizou-se tal método uma vez que contempla o equilíbrio de forças e momentos, sendo assim considerado um método rigoroso de análise (Slope/w, 2008).

2.3 Modelagem de Estabilidade de Taludes

Como discutido previamente, os escorregamentos rotacionais se constituem num importante mecanismo de evolução das voçorocas da região e os estudos que se concentraram na análise da estabilidade dos taludes na área, recorreram à abordagem do equilíbrio limite, empregada para análises do equilíbrio dos corpos, que tem como hipótese:

- Existência de uma linha de escorregamento de forma conhecida e bem definida.
- Respeito a um critério de resistência (normalmente Morh-Coulomb), ao longo da linha de escorregamento (Marangon, 2009).

Como demonstrou Futai (2002), a estabilidade dos taludes das voçorocas a escorregamentos rotacionais é influenciada pelas condições de fluxo hídrico, inclusive não saturado.

A estabilidade foi analisada na mesma seção em que foi feita a modelagem 2D de fluxo. Os parâmetros de resistência ao cisalhamento foram obtidos no estudo de Futai (2002) (Tabela 2).

Tabela 2. Camadas do modelo e seus parâmetros de resistência (Adaptado de Futai, 2002).

Solo em estudo	Sucção (KPa)	Parâmetros de resistência		γ_{nat} (KN/m ³)
		c (KPa)	ϕ	
Horizonte B	Saturado*	8	27,7°	15,4 – 18,5
	100	53	33,0°	
Horizonte C	Saturado*	38	26,4°	16,5 – 18,8
	100	70	25,5°	

*valores efetivos

Nota-se que em função da faixa de sucção considerada, a coesão dos horizontes pedológicos varia bastante e o ângulo de atrito do horizonte C pouco se altera. Tem-se também que o peso específico dos solos B e C oscilam em faixas parecidas de valores.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Modelagem de Fluxo

O modelo criado no Feflow foi calibrado com dados de campo (como já citado anteriormente).

Na Figura 2 são apresentados três cenários

obtidos para uma modelagem contemplando a área de estudo anteriormente à voçoroca (regime permanente), com a voçoroca Mangue Seco e um terceiro cenário com uma segunda

voçoroca hipotética criada além da Mangue Seco (estes dois últimos analisados em termos de regime transitório).

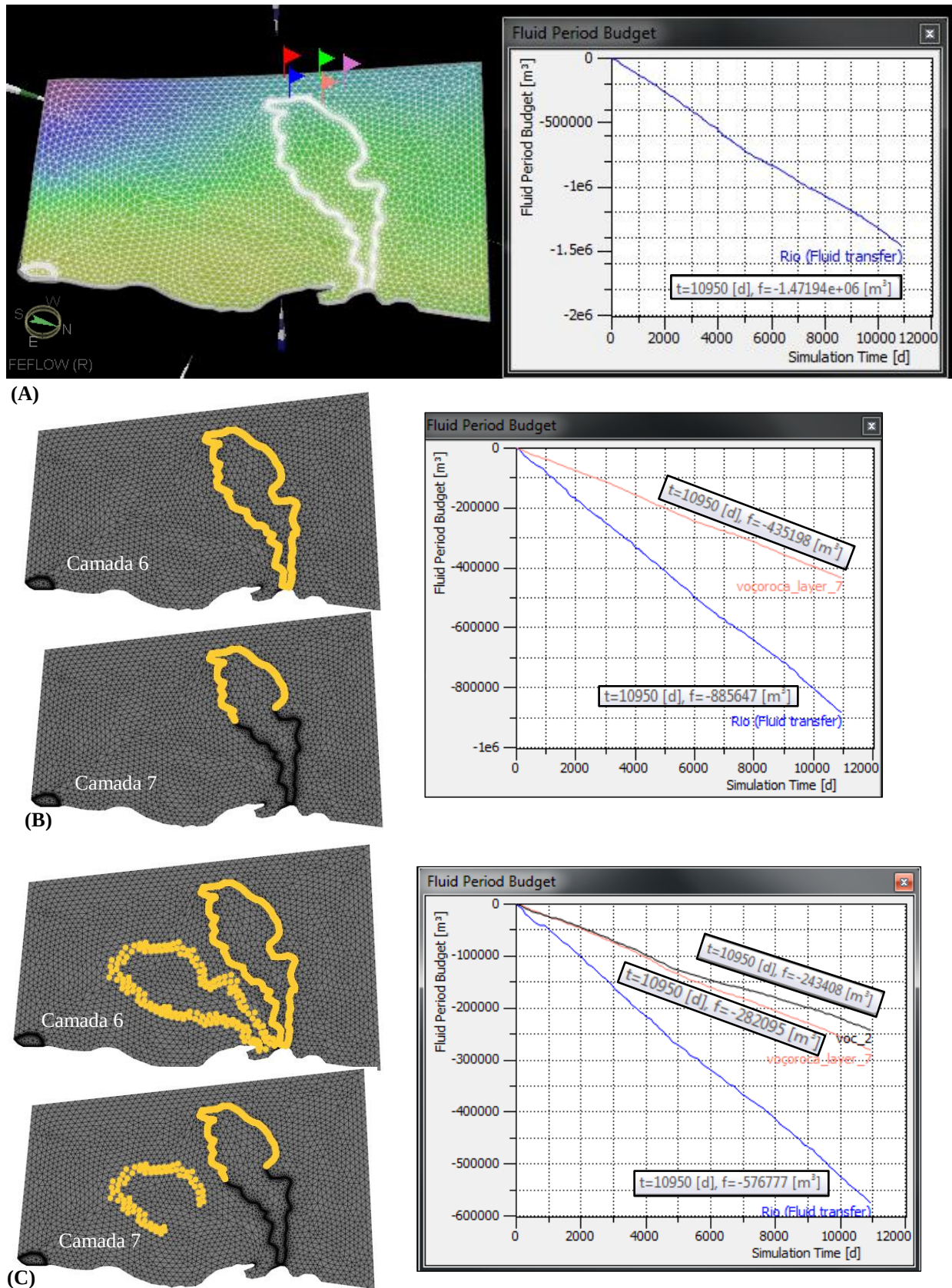


Figura 2. Cenários hidrogeológicos da área de estudo. Em A tem-se a área sem a voçoroca, em B a área com a voçoroca Mangue Seco e em C a área com a segunda voçoroca hipotética. Destaque à direita para o volume contabilizado em cada domínio de estudo.

Pelos dados apresentados na Figura 2, constata-se uma redução do fluxo proveniente dos aquíferos (fluxo de base) de 10,3 % e 25,1 % para os cenários B e C respectivamente (Tabela 3) que é compatível aos dados apresentados no estudo de Costa (2005).

Os resultados do modelo evidenciaram que a voçoroca provoca um pequeno rebaixamento do aquífero livre no entorno e uma pequena elevação do gradiente hidráulico dos taludes marginais à voçoroca.

Tabela 3. Redução do Fluxo de base para os três cenários

Cenário	Domínio	Fluxo de base da área (m ³)	Percentual (%)
A	Rio	1.471.940	100,0
B	Rio	885.647	89,7
	Voçoroca 1	435.198	
C	Rio	576.777	74,9
	Voçoroca 1	282.095	
	Voçoroca 2	243.408	

A seguir tem-se os resultados obtidos para a análise de fluxo 2D com o programa SEEP/W (Figura 3).

Chama-se a atenção, na Figura 3, que o cenário A representa a simulação inicial, portanto antes do início da recarga.

No cenário B, que contempla a recarga na área de estudo, tem-se além do efeito de exfiltração da água na base do talude, o efeito da própria percolação da água pelos horizontes pedológicos.

É essa percolação existente no cenário B que trará condições de simular um NA mais elevado, representando assim a elevação máxima do lençol freático ao longo do ano.

Pode-se visualizar essa elevação do lençol freático pela Figura 3, ou pela análise de estabilidade conduzida no SLOPE/W (Figura 4). Os cenários A e B da Figura 3 são relacionados aos cenários A e B da Figura 4.

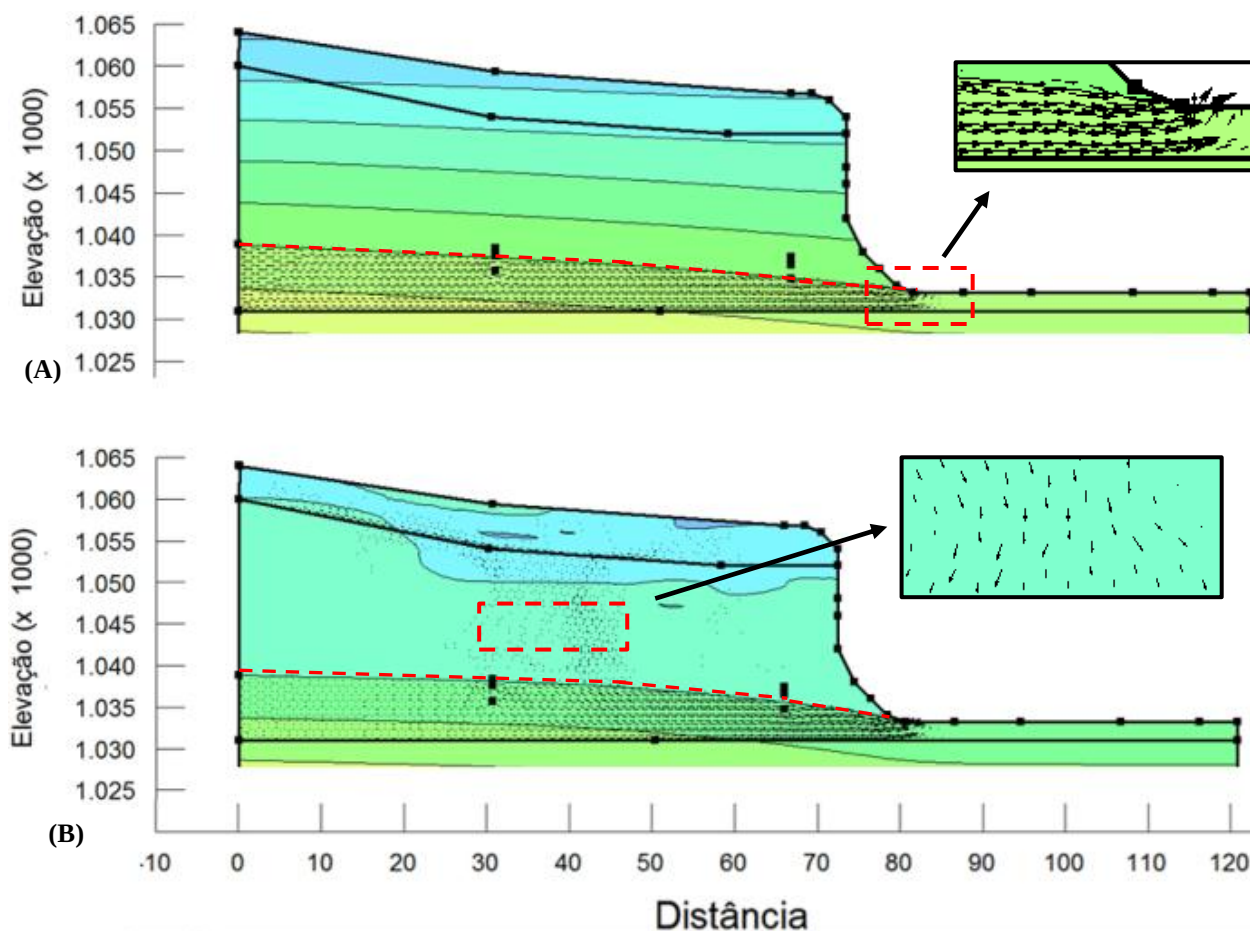


Figura 3. Análise de fluxo obtida do SEEP/W. Destaque para os NA's desenhados manualmente, para a exfiltração na base do talude (em A e B) e para a percolação (em B).

3.2 Método do Equilíbrio Limite

Na Figura 4 tem-se os resultados da estabilidade de taludes para os cenários antes da recarga e ao final da recarga, conduzidas no programa SLOPE/W.

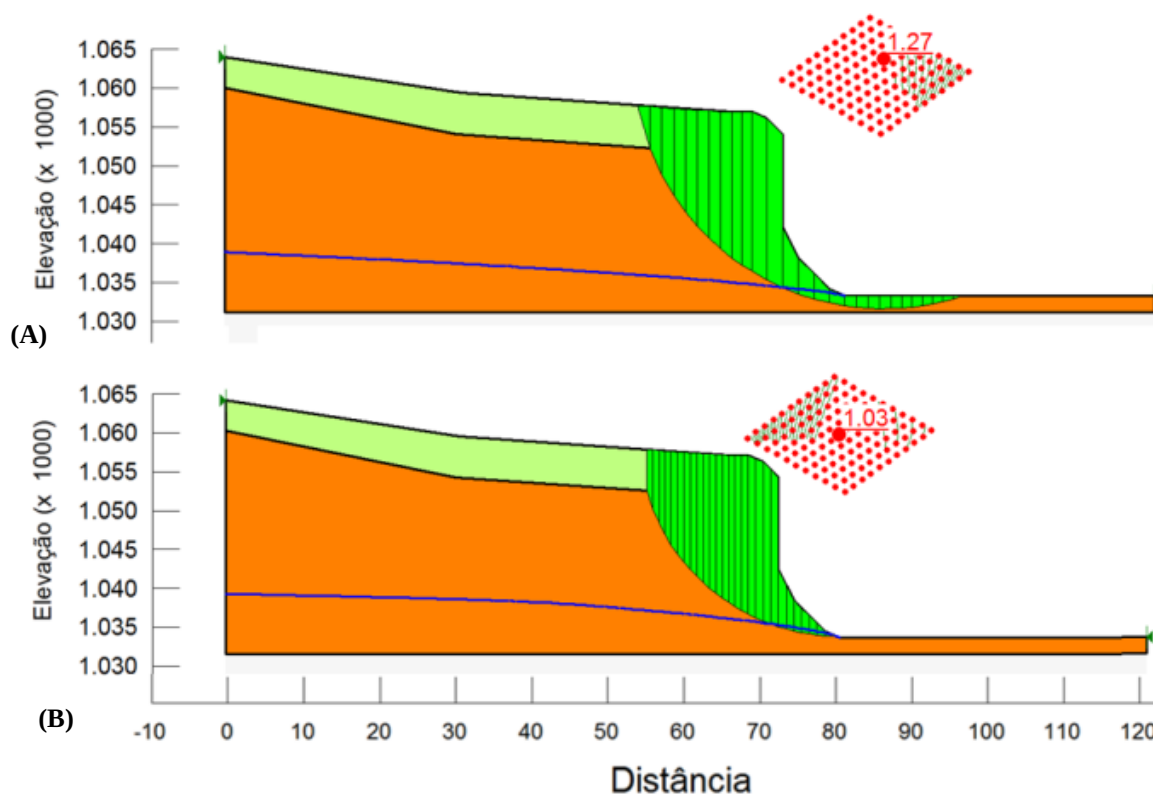


Figura 4. Análises de estabilidade realizadas no SLOPE/W pelo método de Morgenstern-Price.

No cenário A, que representa o nível d'água mais baixo, a análise de estabilidade indica um FS próximo a 1,3 sugerindo uma situação de estabilidade.

No cenário B, em que ocorre a elevação do NA e no qual tem-se habilitado no modelo a presença de trincas de tração que surgem nas bordas da voçoroca, o FS reduz para 1,03 chegando assim ao limite mínimo do equilíbrio ($FS = 1$), constituindo situação de instabilidade iminente.

Importante frisar que outros métodos menos rigorosos utilizados na análise de estabilidade, apontaram para um FS da ordem de 0,98 (método Ordinário) e 0,97 (método de Janbu) para o cenário B ($FS < 1$).

Constata-se dessa forma um processo cíclico de aumento e redução do FS: a infiltração (recarga) promove a elevação do NA e atua

juntamente com a exfiltração do lençol freático na base dos taludes e com o surgimento das trincas de tração, causando a situação de instabilização (escorregamentos rotacionais), reduzindo o FS; já no auge da estiagem, os taludes se encontram estáveis por conta da redução do NA e da exfiltração em suas bases, ocorrendo o ressecamento do solo, o que contribui para aumentar a resistência (dos taludes) e consequentemente do FS.

4 CONCLUSÃO

Através de modelagem de fluxos hídricos em 3D foi possível quantificar o impacto que as voçorocas provocam no regime hídrico local, especialmente na redução dos fluxos de base.

Embora esta modelagem tenha mostrado que

o gradiente hidráulico nos taludes marginais às voçorocas não é muito elevado, a variação sazonal do nível d'água subterrâneo é suficiente para instabilizá-los no auge da recarga que ocorre após o período chuvoso.

De fato, a exfiltração na base do talude associada à elevação do lençol freático e outros fatores, leva a processos de escorregamentos rotacionais que conduzidos de forma cíclica mantêm ativo o processo de evolução das voçorocas.

Importante destacar que à medida que o voçorocamento progride vai ocorrendo em consequência deste a perda de áreas de recarga (infiltração no solo) o que tende a contribuir para o aumento do impacto no regime hídrico local, notadamente na redução do fluxo de base nas bacias voçorocadas.

Conclui-se que a análise de estabilidade de taludes acoplada com a análise de fluxo se constitui num procedimento fundamental para a determinação da segurança de taludes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UFOP, à FAPEMIG (Projeto Universal) e ao CNPq.

REFERÊNCIAS

- Bacellar, L.A.P. (2000). *Condicionantes geológicos, geomorfológicos e geotécnicos dos mecanismos de voçorocamento na bacia do rio Maracujá, Ouro Preto, MG*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 226 p.
- Costa, F.M. (2005). *Análise por métodos hidrológicos e hidroquímicos de fatores condicionantes do potencial hídrico de bacias hidrográficas – Estudo de casos no Quadrilátero Ferrífero (MG)*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, 147 f.
- Dorr, J.N. (1969). *Physiographic, stratigraphic, and structural development of the Quadrilatero Ferrifero, Minas Gerais, Brazil*. United States Geological Survey – USGS, Professional paper V. 641-A, 110 p.
- Drumond, F.N. (2006). *Caracterização e quantificação dos processos erosivos da microbacia do riacho Manoel Félix – MG*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, 99 p.
- Futai, M.M. (2002). *Estudo teórico-experimental do comportamento de solos tropicais não-saturados: Aplicação a um caso de voçorocamento*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 559 p.
- Futai, M.M.; Almeida, M.S.S.; Lacerda, W.A. (2005). Evolução de uma voçoroca por escorregamentos retrogressivos em solo não-saturado., In: *Anais da IV Conferência brasileira sobre esatabilidade de encostas – COBRAE*, p. 443-452, Salvador.
- Gomes, C.J.S. (1986). Estudos estruturais e texturais no Complexo do Bação e nos metassedimentos adjacentes ao Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In: *Anais do XXXIV Congresso Brasileiro de Geologia*, p.1232 - 1245, Goiânia.
- Marangon, M. (2009). Unidade 4 – Estabilidade de taludes. In: *Tópicos em Geotecnia e Obras de Terra*. Universidade Federal de Juiz de Fora, 25 p.
- Salomão, F.X.T e Iwasa, O.Y. (1995). *Erosão e a ocupação rural e urbana*, ABGE/IPT, Cap.3, p.31-57.
- Santos, C.A. e Sobreira, F.G. (2010). Diagnóstico e análise geoambiental das bacias hidrográficas do ribeirão Carioca e dos córregos do Bação e Carioca, afluentes do rio Itabirito (MG), como subsídio ao zoneamento ambiental., In: *Anais do IV Seminário latino americano de Geografia Física e II Seminário latino americano de Geografia Física*, 13.p, Coimbra.
- Slope. (2008). *Stability modeling with SLOPE/W 2007 version – An Engineering methodology*, 3rd ed., Canada, 367 p.
- Sobreira, F.G. (1998). *Estudo das erosões do distrito de Cachoeira do Campo, Ouro Preto*. Relatório final de projeto – FAPEMIG, 120 p.