

INFLUÊNCIA DE FILITOS NO PADRÃO DE FLUXO E NA ESTABILIDADE DE TALUDES DE CAVAS A CÉU ABERTO

Phyllite influence on the pattern of flow and on slope stability of open pit mining

Leonardo Carvalho Ventura*

Luis de Almeida Prado Bacellar**

RESUMO – O trabalho objetivou analisar as possíveis influências que os filitos da formação Batatal proporcionam, atuando como barreiras hidráulicas, tanto no padrão do fluxo hídrico, como também, na estabilidade dos taludes das cavas finais das minas do Tamanduá, Pico e Capitão do Mato, situadas no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Foi feita uma compilação de parâmetros hidrodinâmicos e de resistência ao cisalhamento dos diversos litotipos encontrados nestas cavas. Tais dados substanciaram uma modelagem matemática 2D por diferenças finitas do padrão de fluxo em seções geológicas representativas destas minas e a análise da estabilidade por três métodos de equilíbrio limite (Janbu, Bishop, Morgenstern Price) em 6 cenários diferentes de padrão de fluxo. A análise da condição de estabilidade acoplada à análise de percolação se mostrou eficaz para o objetivo proposto. As componentes verticais de fluxo são relevantes para o nível de segurança de taludes e podem condicionar rupturas locais. O emprego dos valores de condutividade obtidos por retro-análise de modelos hidrogeológicos sugere a possibilidade de ocorrer fluxo pela Formação Batatal.

SYNOPSIS – This work intends to analyze the possible influences caused by the phyllites of the Batatal formation which act as hydraulic barriers on the flow pattern as well as in the slope stability of the bottom pit of the Tamandua, Pico and Capitao do Mato mines, located in the Quadrilatero Ferrifero region, in Minas Gerais State, Brazil. Hydrodynamic parameters and shear strength of various materials found in these pits was gathered in order to provide a 2D mathematical modelling of the flow pattern through finite differences method. The slope stability analyses condition coupled with flow analyses showed to be efficient for the proposed objective. The vertical flux components are relevant to the security level of the slopes and can determine local ruptures. The use of the conductivity values obtained through groundwater modelling back-analysis suggests the likely occurrence of flow through the Batatal formation.

PALAVRAS CHAVE – Estabilidade de taludes, padrão de fluxo, cava a céu aberto, filito.

1 – INTRODUÇÃO

Os litotipos de condutividade hidráulica baixa são considerados condicionantes da estabilidade dos taludes pois podem se comportar como barreiras hidráulicas geológicas, favorecendo muitas vezes o desenvolvimento de fluxos com forte componente vertical e elevados gradientes hidráulicos (Patton e Hendron, 1974; Freeze e Cherry, 1979), podendo levar a rupturas locais como globais.

* Mestre em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto – MG, Brasil; Diretor, Geostável Consultoria e Projetos. E-mail: leonardo.ventura@geostavel.com.br

** Doutor, Professor do Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto- MG, Brasil. E-mail: bacellar@degeo.ufop.br

As consequências das barreiras hidráulicas, que podem assumir diversas dimensões, orientações espaciais e geometrias, ainda não têm sido muito avaliadas quantitativamente. Neste artigo objetiva-se contribuir para o conhecimento da possível influência dos filitos da Formação Batatal ao atuar como barreiras hidráulicas, tanto no padrão do fluxo hídrico, como na estabilidade dos taludes de cavas de céu aberto na região do Quadrilátero Ferrífero (Figura 1), no estado de Minas Gerais, sudeste do Brasil. Estas influências serão avaliadas a partir de análises das condições de taludes das cavas das minas de minério de ferro do Pico, Tamanduá e Capitão do Mato, todas de propriedade da companhia VALE, situadas no flanco leste do Sinclinal Moeda (Dorr, 1969), a sudeste de Belo Horizonte (Figura 1), capital do estado.

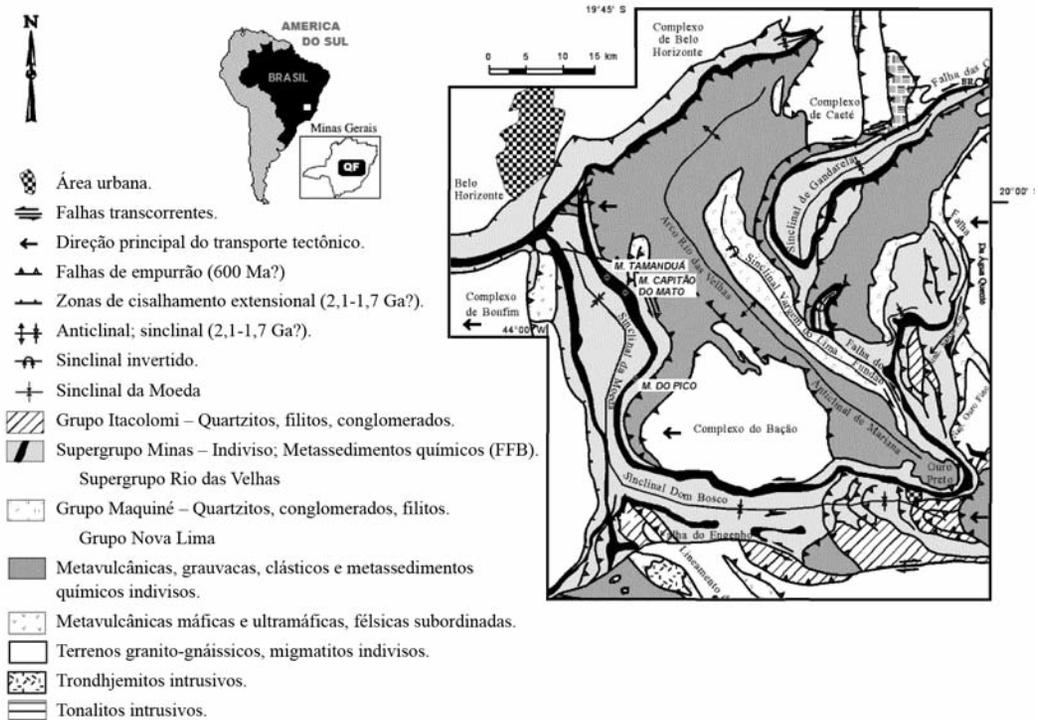


Fig. 1 – Mapa geológico da região Quadrilátero Ferrífero (modificado de Dorr, 1969).

O Quadrilátero Ferrífero (QF) ocupa uma área de aproximadamente 7.190 km², encontrando-se parcialmente inserido no extremo sudeste do Cráton do São Francisco e parcialmente na faixa Araçuai, de idade brasileira (Alkmin & Marshak, 1998). A estratigrafia do QF consiste nas seguintes unidades geológicas: complexos granítico-gnáissicos arqueanos (embasamento); seqüência vulcanossedimentar arqueana (Supergrupo Rio das Velhas); seqüência metassedimentar proterozóica (Supergrupo Minas) e coberturas sedimentares recentes.

2 – MÉTODOS

Inicialmente, fez-se uma compilação de dados de caracterização geológico-geotécnica e hidrogeológica para as áreas das cavas a céu aberto das minas do Tamanduá, Pico e Capitão do Mato, com destaque para as condições litológicas, estruturais/geomecânicas e hidrogeológicas, principalmente das formações Batatal e Cauê, do Supergrupo Minas.

Foram analisados e revistos os dados fornecidos pela VALE, como: mapas topográficos; geometria prevista para as cavas finais; relatórios geológicos e geotécnicos (parâmetros de resistência); dados climáticos e hidrogeológicos (dados piezométricos, vazões de surgências e cursos de água e parâmetros hidrodinâmicos).

Com base no tratamento destes dados, foram selecionadas três seções geológica-geomecânicas representativas das situações típicas para cada mina (seções verticais SE-8750, SE-8850 e SE-9000, do talude leste da Mina do Tamanduá; as seções SV-8250, SV-8350 e SV-8500, do talude sudeste da Mina do Pico; e as seções SVC-4100, SVC-4300 e SVC-4800, do talude nordeste da Mina Capitão do Mato), todas com regime de fluxo influenciado por barreiras hidráulicas exercidas pelas rochas da Formação Batatal.

A modelagem das condições de fluxo destas seções foi realizada pelo método dos elementos finitos, com o programa SEEP/W®, em regime de fluxo permanente e com discretização do modelo em malhas de elementos triangulares; as seções geológicas se estenderam até os divisores de água superficiais, assumidos como coincidentes com os divisores de água subterrâneos e, portanto, modelados como fronteira impermeável (vazão nula); as extremidades de jusante e inferior (fronteiras inferior e jusante) das seções foram posicionadas a uma distância média de 80 m do centro e entre 90 e 100 m do “bottom pit”, respectivamente, também como fronteiras impermeáveis. Para o “bottom pit” de cada seção considerou-se que os nós de superfície dos elementos da malha possuem a carga de pressão nula em virtude da condição imposta pela eficiência dos poços de rebaixamento instalados na formação ferrífera (Formação Cauê). O restante da superfície dos taludes acima do “bottom pit” foi considerada como do tipo vazão definida, com valor equivalente à taxa de recarga anual em cada litologia. Foram empregados dados dos instrumentos de medida do nível de água e curvas características de cada unidade para calcular a recarga por retro-análise em condições de fluxo permanente.

Baseando-se em dados de campo (e.g.: Scarpelli, 1994), assumiu-se que a frequência das descontinuidades nas unidades geológicas, inclusive na Formação Batatal, é de tal ordem que as mesmas possam ser tratadas como um meio fraturado com porosidade equivalente (Bear & Verruijt, 1987), possibilitando o emprego de método dos elementos finitos.

Os parâmetros hidrodinâmicos empregados foram obtidos a partir do tratamento de dados fornecidos pela VALE. A análise das condições de estabilidade foi executada através do programa SLOPE/W®, incorporando-se, de forma acoplada, os resultados prévios simulados com o programa SEEP/W®. A estabilidade dos taludes foi determinada utilizando-se os métodos de equilíbrio limite Bishop, Janbu e Morgenstern Price. Apesar dos taludes serem constituídos por maciços rochosos variavelmente fraturados e intemperizados, assumiu-se que o equilíbrio-limite seria adequado para analisar o grau de estabilidade (Ventura, 2009), como é comum nas minas da região (Silva, 2006; e Zea Huallanca, 2004).

Ao final, foram apresentadas as possíveis influências nas condições de fluxo e nos coeficientes de segurança com a variação da condutividade hidráulica dos filitos.

3 – CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS

3.1 – Caracterização geológica

Os litotipos que formam os maciços das minas do Tamanduá do Pico e Capitão do Mato (Figura 2) são constituídos pelo Grupo Caraça (Formações Moeda e Batatal), Unidade Transicional (seqüência vulcano-sedimentar entre as formações Batatal e a Cauê), Grupo Itabira (Formações Cauê) e diques máficos.

A Formação Moeda, na base desta seqüência de idade proterozóica superior, é composta por quartzitos de granulometria variada, normalmente fina a média, com níveis grossos a microconglo-

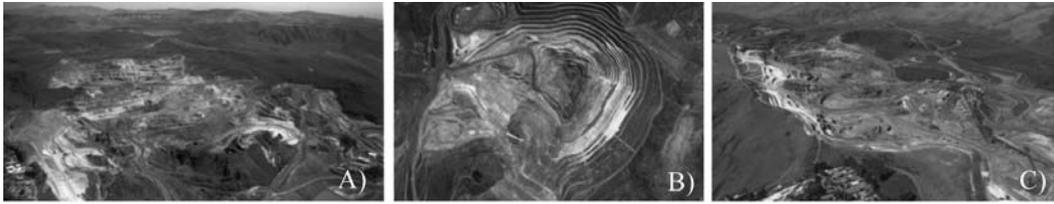


Fig. 2 – Fotos aérea das minas do Tamanduá (Fonte: VALE), do Pico (Fonte: Google Earth) e Capitão do Mato (Fonte: VALE).

meráticos, que constituem um aquífero com porosidade fissural. Sobreposta a esta unidade, ocorre a Formação Batatal, composta por filitos sericíticos, dolomíticos, quartzosos e carbonosos e por lentes descontínuas de metachert. Filitos dolomíticos e quartzosos e camadas e lentes de metachert constituem a Unidade Transicional Vulcano-Sedimentar, segundo OPGPM (2005) e Suckau (2005). A esta unidade se sobrepõe os itabiritos e corpos hematíticos da Formação Cauê, de onde é extraído o minério de ferro e que constitui bom aquífero, ao menos na área das minas (MDGEO 2005 a, b e c). O filito Batatal é tido como uma eficiente barreira hidráulica entre os aquíferos das formações Moeda e Cauê (Silva, 2006), não obstante a presença de camadas e lentes de metachert no seu interior e na unidade transicional.

Cortando a estruturação regional, especialmente na mina Capitão do Mato, ocorrem diques máficos intrusivos (de espessura métrica a decamétrica), de filiação gabrótica. Estes diques normalmente atuam como uma eficiente barreira hidráulica (OPGPM, 2005).

Como as minas se situam em flanco de um grande sinclinal, estas unidades geológicas apresentam acamamento com mergulhos elevados. Na mina do Tamanduá, a seqüência estratigráfica encontra-se invertida por dobramento, pois as unidades das formações Cauê e Batatal mergulham para leste-sudeste, sob o Quartzito Moeda, mais antigo.

Para o aprofundamento destas cavas é preciso em certo momento iniciar o rebaixamento do aquífero Cauê, resultando em elevados gradientes hidráulicos entre este e o aquífero Moeda, aumentando o risco a escorregamentos.

3.1.1 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento

A partir da setorização geológico-geomecânica adotada nas minas embasada no levantamento sistemático de dados de graus de alteração (IPT, 1984) e de coerência das rochas (Guidicini *et al.*, 1972) e nas classes de maciços rochosos de Bieniawski (1989), efetuou-se uma compilação de parâmetros de resistência ensaiados para os litotipos presentes nas minas e uma posterior consolidação (Quadro 1).

Quadro 1 – Consolidação dos parâmetros de resistência dos litotipos encontrados nas minas.

Material / Classificação Geotécnica*		$\gamma_{nat} / \gamma_{sat}$ (kN/m ³)	Parâmetros de Resistência				Ensaio Considerado (Unid.)
			Paralela		Paralela		
			c' (kN/m ²)	ϕ' (°)	c' (kN/m ²)	ϕ' (°)	
FS (Filito Sericitico)	V/VI	18/20			63,3	21,0	3
	IV	20/22			101,7	32,9	5
	III	23/24			174,0	38,3	4
	II	28/28			1300,0	49,0	1
FD (Filito Dolomítico)	VI	18/20			47,8	21,2	8
	V	19/20			52,7	26,1	7
	IV	20/22			116,1	29,4	8
QZ (Quartzito)	VI	20/22			29,4	20,1	7
	V	20/22			29,1	30,5	3
	IV	22/22			40,7	37,5	8
	II/III	24/26			970,0	55,3	3
QX (Quartzito micáceo)	VI	20/22			29,4	20,1	–
	V	20/22			29,1	30,5	–
	IV	22/22			40,7	37,5	–
	III	24/26			727,5	51,8	–
HM (Hematitas)	V/VI	37/40			69,0	36,8	18
	III/IV	40/44			229,6	40,3	4
	II	45/50			366,7	44,0	3
IB (Itabiritos)	VI/V	25/28	16,6	34,7	51,8	36,6	10 e 12
	III/IV	30/30	31,4	34,1	83,5	40,3	5 e 4
AIF (Itabirito Argiloso)	V/VI	22/24			83,3	33,0	3
MCH (Metachert)	V/VI	24/25			56,6	31,7	5
B (Básica)	VI	19/19			36,5	30,9	6

Nota: *Adaptado de Bieniawski (1989).

3.1.2 – Parâmetros hidrodinâmicos dos maciços

A definição das propriedades hidrodinâmicas (condutividade hidráulica e armazenamento) de cada material foi baseada essencialmente na litologia, mas algumas unidades litológicas mapeadas foram agrupadas, quando mostravam semelhança litológica entre si ou quando apareciam em corpos diminutos, irrelevantes na escala de discretização dos modelos numéricos.

A partir de modelos numéricos hidrogeológicos efetuados nas minas (MDGEO, 2005a,b,c), as diversas litologias mapeadas foram agrupadas, conforme suas propriedades hidrodinâmicas, resultando em 11 grupos de materiais (Quadro 2).

Quadro 2 – Consolidação dos parâmetros de condutividade hidráulica, coeficientes de armazenamento específico (Ss) e porosidade efetiva (Sy) dos maciços das minas.

Material	Kx (m/dia)	Ky (m/dia)	Kz (m/dia)	Ss (m ⁻¹)	Sy
Itabirito (IB) e Hematita média (HM)	2,4166	1,1041	1,4166	0,00004	0,0850
Itabirito (IB) e Hematita macia (HM)	1,5000	0,7500	1,0000	0,00004	0,2500
Itabirito Compacto (IB)	3,1666	1,4583	1,8333	0,00004	0,0633
Itabirito Argiloso (AIF)	0,5333	0,4083	0,5333	0,00004	0,0150
Hematita Compacta (HM)	3,7500	1,6875	2,2500	0,00006	0,0900
Filito Dolomítico (FD)	0,0009	0,0009	0,0009	0,00005	0,0050
Filito Sericítico (FS)	0,0010	0,0010	0,0010	0,00005	0,0050
Quartzito Moeda (QZ e QX)	0,1333	0,1366	0,1333	0,00005	0,0203
Rocha Básica Intrusiva (B)	0,0003	0,0003	0,0003	0,00004	0,0036
Metachert (MCH)	0,1333	0,1333	0,1333	0,00005	0,0100
Coberturas e brechas	3,0000	3,0000	3,0000	0,00005	0,1000

3.1.3 – Determinação das curvas características das litologias

Para cada material, assumiu-se que na zona não saturada a condutividade hidráulica varia com a sucção de acordo com o modelo de Fredlund e Xing (1994). Com os valores consolidados de condutividade hidráulica saturada vertical (Quadro 2) de cada material aplicou-se o método de Fredlund e Xing (1994), utilizando a interface disponível do SEEP/W[®] para obter a curva de variação da condutividade com a sucção (Figura 3).

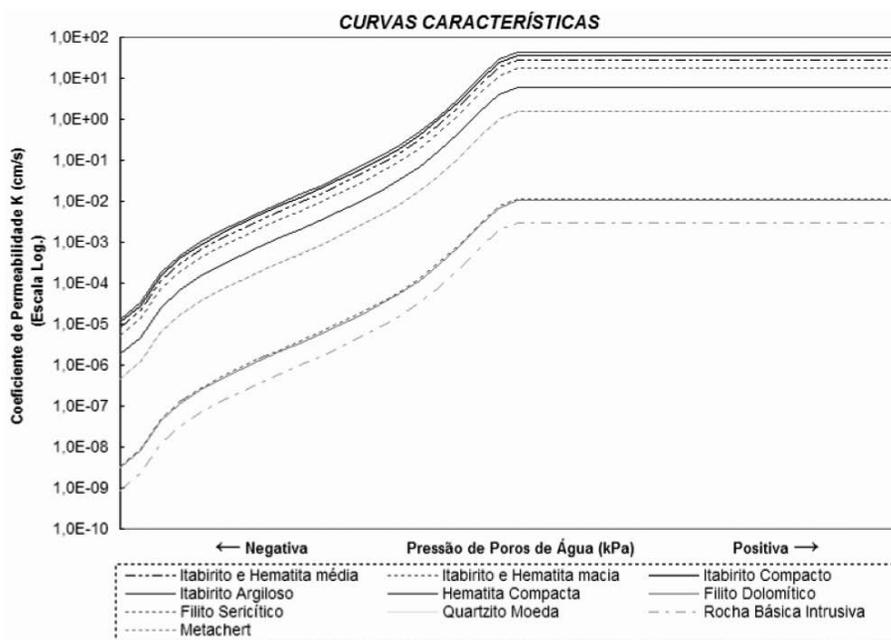


Fig. 3 – Curvas características dos litotipos das minas Tamanduá, Pico e Capitão do Mato.

Assumiu-se que o fluxo da zona não saturada obedece à Equação de Richards (Ventura, 2009) e que a condutividade hidráulica pode ser obtida através de procedimentos usualmente empregados para materiais inconsolidados e com porosidade intergranular, como no modelo de Fredlung e Xing (1994). Face ao desconhecimento das condições reais de permo-porosidade, adotou-se para todos os materiais uma curva representativa de materiais arenosos do banco de dados do SEEP/W[®]. Este procedimento simplificado resultou em curvas com formas semelhantes, deslocadas no eixo y em função de variações da condutividade hidráulica saturada. Este tipo de abordagem tem sido aplicada para meios fraturados, pela dificuldade de se empregar modelos mais sofisticados e também por ser preferível seu emprego que assumir valores constantes de condutividade na zona não saturada (Liu *et al.*, 2002). Portanto, na modelagem de fluxo, a recarga foi obtida por retroanálise variando-se os valores de vazão nas células da fronteira superior das seções (Quadro 4), considerando-se os valores de condutividade das respectivas curvas características e demais condições de contorno já discutidas, até serem reproduzidas as cotas médias de nível de água determinadas em campo.

4 – ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE BARREIRAS HIDRÁULICAS

As análises foram desenvolvidas nas nove seções geológico-geomecânicas representativas para as geometrias das cavas finais de exaustão previstas e fornecidas em 2007 pela VALE (Figura 4).

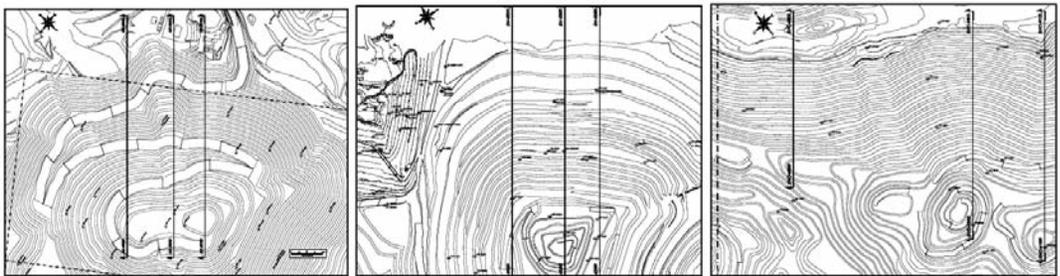


Fig. 4 – Localização das seções verticais SE-8750, SE-8850 e SE-9000, na cava da mina do Tamanduá; SV-8250, SV-8350 e SV-8500, da mina do Pico; e SVC-4100, SVC-4300 e SVC-4800 da Mina Capitão do Mato.

As particularidades litológicas e geométricas de cada seção geotécnica estão apresentadas no Quadro 3.

A definição da condição de contorno para o fluxo na região superior dos taludes (taxa de recarga), onde predominam o filito Batatal e o quartzito Moeda, foi determinada a partir dos dados de monitoramento dos indicadores de nível de água apresentados por Ventura (2009).

A condição de fronteira do tipo vazão definida para a superfície dos taludes foi determinada da seguinte forma. O nível médio da água subterrânea (NA) foi obtido a partir da projeção nas seções de medidas obtidas em piezômetros e indicadores de nível de água situados nas proximidades. O nível de água atual foi considerado representativo da situação final, porque o filito Batatal impossibilita grandes rebaixamentos e também pelo fato dos aquíferos já se encontrarem em geral muito rebaixados em relação à situação esperada quando da cava final. No modelo de fluxo, os valores de recarga para cada unidade geológica em cada seção foram obtidos por retro-análise, variando-se os valores de infiltração na fronteira superior das seções (Quadro 4) e empregando-se as respectivas curvas características.

Quadro 3 – Particularidades litológicas e geométricas das seções verticais de análise.

Seção Vertical		Espessura da Camada (m)		Mergulho Camada FS/FD (°)	Talude Global			Observações
		Filito Sericítico (FS)	Filito Dolomítico (FS)		Elevação Máxima (m)	Elevação Mínima (m)	Altura (m)	
Mina do Tamandá	SE - 8750	30 a 40	20 a 30	70 a 80	1200	970	230	
	SE - 8850	55 a 70	50 a 60	70 a 80	1190	980	210	
	SE - 9000	40 a 50	55 a 70	70 a 80	1190	980	210	
Mina do Pico	SV - 8250	70 a 80	25 a 35	85 a 90	1400	1230	170	
	SV - 8350	100 a 110	40 a 45	85 a 90	1456	1190	266	Presença de FS na camada de FD
	SV - 8500	75 a 100	80 a 90	85 a 90	1405	1280	125	Presença de MCH na camada de FD
Mina C. do Mato	SVC - 4100	145 a 160	75 a 80	60 a 70	1419	1120	299	
	SVC - 4300	180 a 200	75 a 105	60 a 70	1415	1130	285	
	SVC - 4800	95 a 110	50 a 60	60 a 70	1445	1240	205	

Quadro 4 – Valores de recarga obtidos por retroanálise.

Seção Geotécnica		Recarga do Aquífero (cm/s)				
		Quartzitos (QZ e QX)	Formação Ferrífera (IB /HM)	Metachert (MCH)	Filitoso Dolomíticos (FD)	Filitos Sericíticos (FS)
Mina do Tamandá	SE - 8750	7,00E-06	5,05E-07	5,05E-07	1,52E-07	1,52E-07
	SE - 8850	3,00E-06	5,05E-07	5,05E-07	1,52E-07	1,52E-07
	SE - 9000	9,00E-07	5,05E-07	5,05E-07	1,52E-07	1,52E-07
Mina do Pico	SV - 8250	5,00E-07	5,05E-07	5,05E-07	1,52E-07	1,52E-07
	SV - 8350	6,00E-07	5,05E-07	5,05E-07	1,52E-07	1,52E-07
	SV - 8500	4,50E-07	5,05E-07	5,05E-07	1,52E-07	1,52E-07
Mina C. do Mato	SVC - 4100	–	5,05E-07	5,05E-07	1,52E-07	4,80E-07
	SVC - 4300	–	5,05E-07	5,05E-07	1,52E-07	4,00E-07
	SVC - 4800	5,20E-07	5,05E-07	5,05E-07	1,52E-07	4,00E-07

A simulação em regime de fluxo permanente de cada seção (modelagem 2D) envolveu a análise em cinco cenários distintos, objetivando compreender a influência da condutividade hidráulica da Formação Batatal no padrão de fluxo e nas condições de estabilidade de taludes. O cenário inicial (1) apresenta condições de fluxo definidas a partir dos parâmetros hidrodinâmicos consolidados (Quadro 2), e a calibração do NA de acordo com os dados de monitoramentos piezométricos (Ventura, 2009). Os Cenários 2 e 3 tiveram os valores da condutividade hidráulica dos filitos Batatal reduzidos em 5 e 10 vezes, respectivamente, em relação ao cenário 1. Já nos cenários 3 e 4 os valores da condutividade hidráulica destes materiais foram majorados em 5 e 10 vezes, respectivamente.

A magnitude de variação da condutividade hidráulica por cenários foi determinada com base nos dados de descontinuidades dos maciços rochosos em filitos da Formação Batatal levantados por Scarpelli (1994). Assim, a partir desses dados e da Lei Cúbica (Snow, 1969), estimaram-se possíveis variações dos valores de condutividade nestes maciços (filitos sericíticos e dolomíticos) devido às descontinuidades no maciço (Ventura, 2009). Os valores de condutividade extremos empregados nas modelagens, sobretudo os mais altos, chegam a ser pouco realistas, mas foram usados para simular o efeito da Formação Batatal nas condições de fluxo.

A título de exemplo, as condições de fluxo estabelecidas nas seções SE-8850 e SVC-4300 em alguns dos cenários são apresentadas nas Figuras 5 e 6, respectivamente. Estas seções se distinguem

por apresentar camadas menos permeáveis (dique de rocha básica na SE-8850) e mais permeáveis (camada de metachert na SVC- 4300) junto aos filitos da Formação Batatal.

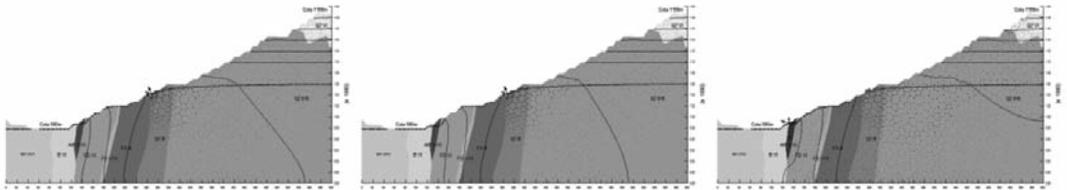


Fig. 5 – Seção SE-8850 da Mina do Tamanduá – Cenários 1, 2 e 4, respectivamente. Em cada seção, o comprimento das setas é proporcional a magnitude de fluxo.

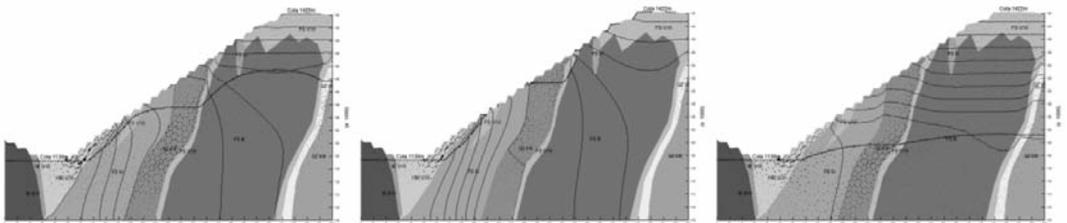


Fig. 6 – Seção SVC-4300 da Mina Capitão do Mato – Cenários 1, 2 e 4, respectivamente. Em cada seção, o comprimento das setas é proporcional a magnitude de fluxo.

De forma geral, o comportamento do NA em todas as seções mostrou-se coerente, pois nos materiais com condutividade hidráulica elevada, como os quartzitos e metacherts, e baixa, como os filitos, o gradiente hidráulico é baixo e alto, respectivamente (Figura 6). Verificou-se também que as camadas de metachert exercem importante função drenante nos filitos da Formação Batatal.

Em taludes de grande porte, a posição e a espessura das barreiras hidráulicas condicionam fortemente o nível de saturação da superfície do talude, estabelecimento do NA em porções superiores. Em situações em que uma barreira mais espessa encontra-se na posição subvertical e aflorando nas porções altas do talude, há grandes possibilidades da porção intermediária e, principalmente, a inferior apresentar-se em condições de elevada saturação, maior grau de saturação. Outra situação de elevada saturação pode ser configurada quando há espessas camadas de barreiras hidráulicas dificultando que o NA a montante seja afetado pelo rebaixamento realizado no fundo da cava.

A partir da modelagem de fluxo, avaliou-se a condição de estabilidade de cada seção utilizando o programa SLOPE/W® com os métodos de equilíbrio limite: Bishop Simplificado (Bishop, 1955), Janbu Simplificado (Janbu, 1968) e Morgenstern e Price (1965). Para este último, adotou-se a função de meia senoide (*Half-sine function*).

As avaliações de estabilidade foram desenvolvidas para seis cenários distintos. Para cada cenário em cada seção geológica, avaliou-se a variação dos coeficientes de segurança em duas superfícies de ruptura. A primeira é a superfície crítica, gerada automaticamente para aquela correspondente ao menor fator de segurança. A segunda foi especificada como aquela que mobilizasse maior número de bancos do talude (ruptura global) e interceptasse, obrigatoriamente, o nível de água na condição de calibração inicial (cenário 1). Esta segunda superfície foi considerada, uma vez que em algumas seções da mina do Pico e Capitão do Mato a superfície crítica não intercepta o NA, impossibilitando a análise da influência do padrão de fluxo na estabilidade.

Nos cenários 1 a 5 foi analisada a estabilidade para as respectivas análises de fluxo, empregando-se os parâmetros de resistência consolidados no Quadro 1. No cenário 6 repetiu-se as condições do cenário 1, porém assumiu-se uma carga hidráulica invariável na vertical (equipotenciais de

fluxo verticais), como é comum em análises de estabilidade, que normalmente não dispõem de modelagens de fluxo. Este cenário serviu, portanto, para balisar a influência de componentes de fluxo ascendentes e descendentes na estabilidade dos taludes.

Nas figuras 7 e 8 e nas figuras 9 e 10 são apresentados alguns exemplos de resultados de análise de estabilidade (seções SE-8850 e SVC-4300, respectivamente) obtidos para tais cenários considerando as duas superfícies de ruptura analisadas.

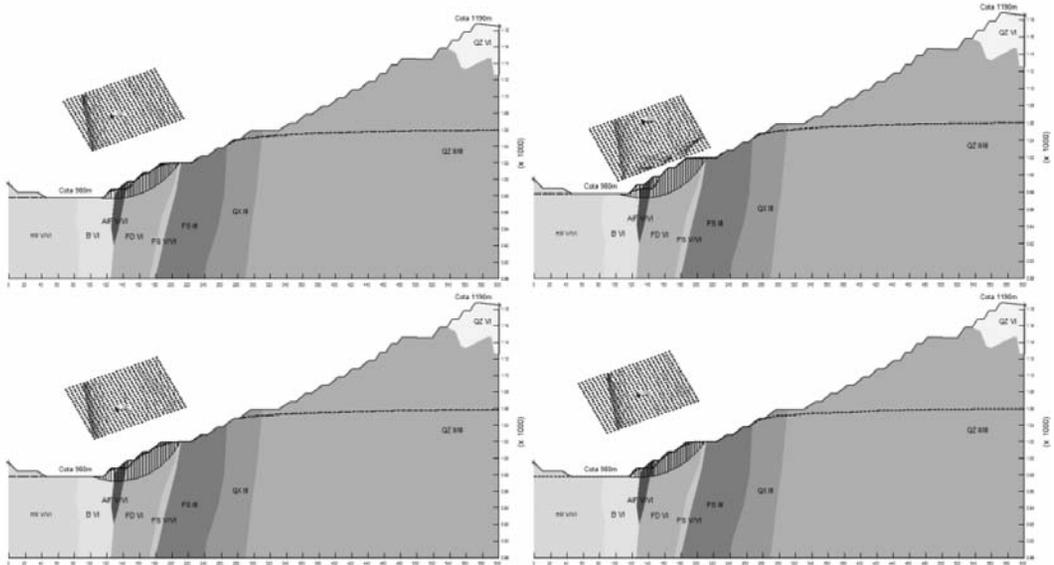


Fig. 7 – Seção SE-8850 da Mina do Tamanduá – Superfície crítica, análise de estabilidade dos Cenários 1, 2, 4 e 6, respectivamente.

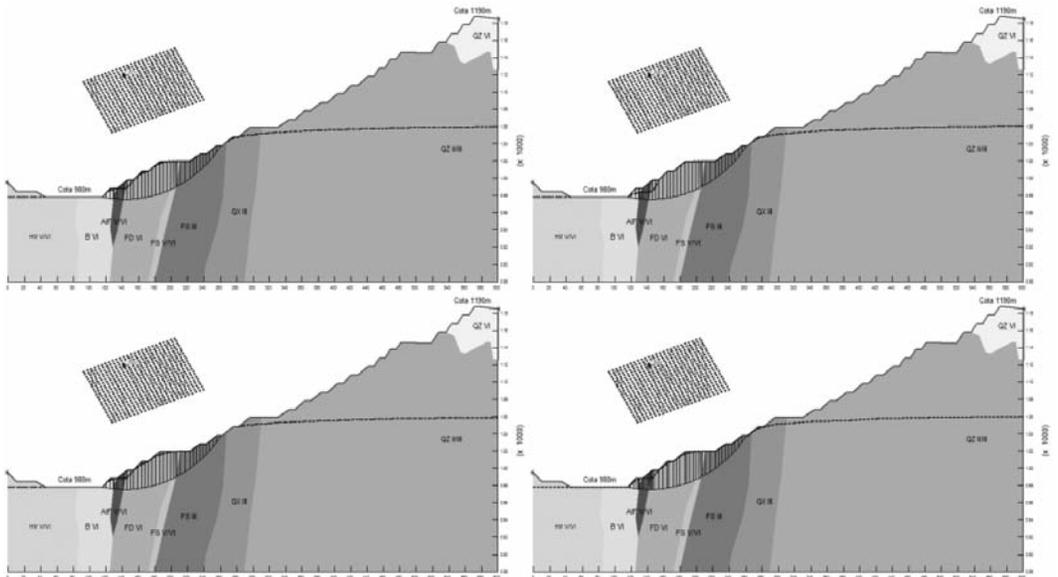


Fig. 8 – Seção SE-8850 da Mina do Tamanduá – Superfície 7242, análise de estabilidade dos Cenários 1, 2, 4 e 6, respectivamente.

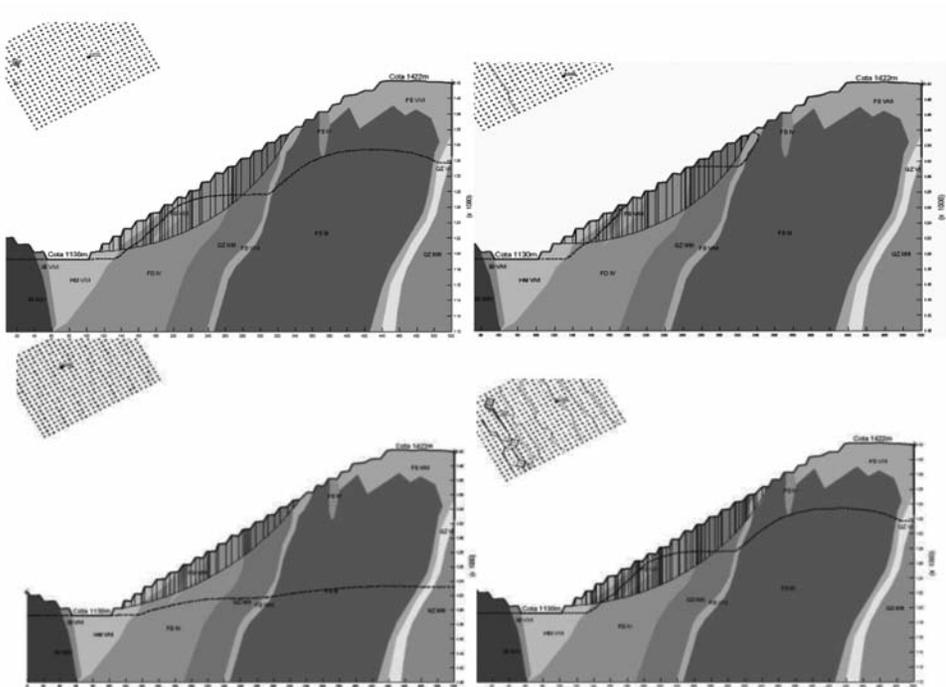


Fig. 9 – Seção SVC-4300 da Mina Capitão do Mato – Superfície crítica, análise de estabilidade dos Cenários 1, 2, 4 e 6, respectivamente.

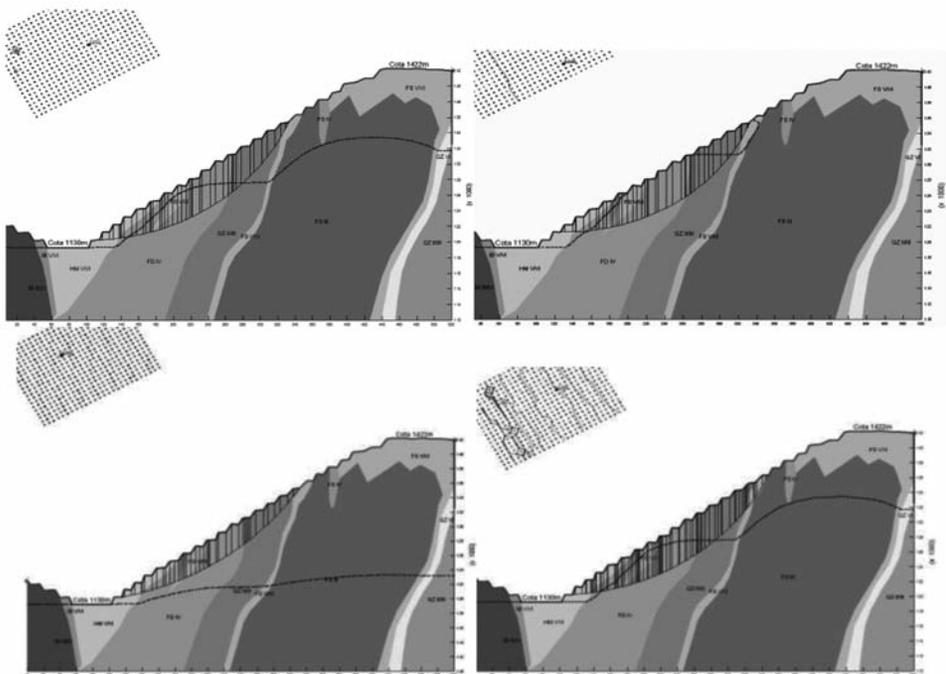


Fig. 10 – Seção SVC-4300 da Mina Capitão do Mato – Superfície 3930, análise de estabilidade dos Cenários 1, 2, 4 e 6, respectivamente.

Os valores dos fatores de segurança obtidos para os seis cenários analisados nas três seções de cada mina, considerando a ruptura crítica e a global, são mostrados no Quadro 5.

Quadro 5 – Fatores de segurança para cada cenário em cada seção geotécnica.

Seção Vertical		F. S. – Método de Elemento Finito																		
		Superf. Ruptura	Cenário 1			Cenário 2			Cenário 3			Cenário 4			Cenário 5			Cenário 6		
			Bishop	Janbu	M. Price															
Mina do Tamandua	SE - 8750	Crítica	2,198	2,184	2,243	2,038	1,889	1,988	2,030	1,866	1,985	2,247	2,174	2,242	2,231	2,165	2,227	2,244	2,178	2,240
		10651	2,488	2,358	2,509	2,478	2,347	2,499	2,476	2,346	2,500	2,519	2,395	2,540	2,553	2,434	2,574	2,478	2,355	2,499
	SE - 8850	Crítica	1,109	1,025	1,141	1,186	1,063	1,229	1,234	1,095	1,281	1,090	0,976	1,136	1,093	0,983	1,134	1,078	0,997	1,109
		7242	1,433	1,400	1,431	1,493	1,451	1,490	1,480	1,444	1,526	1,434	1,401	1,432	1,458	1,428	1,456	1,530	1,507	1,531
	SE - 9000	Crítica	0,803	0,681	0,816	0,782	0,658	0,794	0,787	0,649	0,791	1,423	1,233	1,428	1,597	1,453	1,614	0,937	0,804	0,953
		5288	0,965	0,886	0,958	0,943	0,864	0,936	0,939	0,860	0,932	1,756	1,644	1,751	1,790	1,672	1,782	1,125	1,037	1,117
Mina do Pico	SV - 8250	Crítica	1,352	1,281	1,344	0,916	0,820	0,929	0,890	0,791	0,905	1,344	1,281	1,352	1,342	1,278	1,349	1,343	1,280	1,350
		8106	1,444	1,294	1,418	1,087	0,960	1,118	1,112	0,970	1,150	1,435	1,309	1,459	1,435	1,309	1,459	1,417	1,293	1,443
	SV - 8350	Crítica	1,291	1,225	1,281	1,000	0,813	0,997	0,833	0,775	0,846	1,281	1,225	1,291	1,281	1,225	1,291	1,274	1,236	1,282
		6832	1,607	1,398	1,579	1,276	1,072	1,320	1,256	1,053	1,301	1,579	1,398	1,608	1,579	1,398	1,608	1,579	1,398	1,601
	SV - 8500	Crítica	1,101	1,038	1,057	0,671	0,620	0,684	0,684	0,599	0,662	1,094	1,038	1,101	1,094	1,038	1,101	1,094	1,025	1,100
		2613	1,164	1,051	1,156	0,730	0,643	0,753	0,713	0,628	0,736	1,164	1,063	1,171	1,167	1,060	1,175	1,155	1,052	1,164
Mina C. do Mato	SVC - 4100	Crítica	0,856	0,787	0,847	0,349	0,329	0,357	0,253	0,247	0,258	0,933	0,889	0,941	0,928	0,887	0,937	0,846	0,786	0,855
		1936	0,898	0,815	0,899	0,882	0,803	0,868	0,789	0,719	0,777	1,071	0,962	1,060	1,074	0,964	1,063	0,899	0,816	0,899
	SVC - 4300	Crítica	0,870	0,817	0,872	0,649	0,599	0,650	0,647	0,597	0,648	0,996	0,957	0,993	1,002	0,961	0,998	0,863	0,816	0,860
		3930	0,989	0,949	1,001	0,732	0,679	0,725	0,730	0,677	0,723	1,240	1,154	1,216	1,256	1,166	1,231	1,001	0,946	0,988
	SVC - 4800	Crítica	1,084	1,039	1,068	0,726	0,687	0,742	0,666	0,637	0,682	1,068	1,039	1,084	1,071	1,041	1,086	1,102	1,063	1,121
		1587	1,258	1,179	1,250	0,830	0,755	0,838	0,808	0,731	0,817	1,270	1,196	1,277	1,270	1,196	1,277	1,243	1,172	1,251

Como esperado, o comportamento do fluxo e os fatores de segurança são diferentes nas três minas, em função especialmente das características geológico-geotécnicas dos materiais e da geometria dos taludes das cavas. As superfícies de ruptura mais profundas e com menores F.S. foram encontrados na mina Capitão do Mato, que apresenta os taludes globais mais íngremes (Quadro 3). Os fatores de segurança para a situação da cava final foram às vezes inferior a 1,0, indicando a necessidade da adoção de medidas de controle para manter a estabilidade no futuro.

Ao se comparar os três métodos de equilíbrio limite, tem-se que os valores médios de FS obtidos pelo método de Janbu são menores (Quadro 6), mais conservadores. Os resultados obtidos pelos métodos de Bishop e Morgenstern Price são similares, sendo que o último é tradicionalmente considerado mais acurado. Esta similaridade é explicada pelo fato de que em rupturas circulares as forças entre as lamelas deixam de ser contempladas no método de Morgenstern Price.

Quadro 6 – Comparativo de valores médios dos F.S. por método de equilíbrio limite.

Bishop é maior		Janbu é maior		Morgenstern Price é maior	
Janbu	M. Price	Bishop	M. Price	Bishop	Janbu
7,46%	- 0,65%	- 8,24%	- 8,97%	0,63%	8,03%

Obs: O sinal negativo indica resultado menor.

A variação imposta na condutividade hidráulica dos filitos dolomíticos e sericíticos da Formação Batatal proporcionou diferentes condições de fluxo subterrâneo e de configuração do NA, que, conseqüentemente, promovem alterações na geometria e localização das superfícies de

rupturas críticas. Por exemplo, observa-se uma tendência de superfícies de rupturas críticas mais rasas em maciços drenados e mais profundas em maciços com maior nível de saturação.

A presença de unidades mais permeáveis no interior das camadas dos filitos Batatal, como o metachert, proporciona um efeito benéfico quanto à segurança, pois rebaixa muito o NA (por exemplo, o cenário 1 da Figura 7). Porém, as menos permeáveis, como os diques básicos, causam o inverso, e tendem a criar fluxos ascendentes a montante. Este fenômeno fica bem demonstrado na seção SE-8850 (Figura 5), da mina do Tamanduá, que apresenta o menor F.S. desta mina (Quadro 5).

A variação dos fatores de segurança (Quadro 5) mostra uma tendência geral esperada, uma vez que ao reduzir os valores das condutividades dos filitos (cenários 2 e 3) tem-se a elevação do nível freático, com redução da percolação de água pelos filitos e, conseqüentemente, a redução dos níveis de segurança. A elevação do nível freático proporciona a saturação de setores do filito antes não saturados, levando à diminuição das tensões efetivas. Outro aspecto relevante para a redução dos coeficientes de segurança foi o aumento dos fluxos ascendentes nos quartzitos da Formação Moeda imediatamente a jusante dos filitos, reduzindo a resistência ao cisalhamento. Esta afirmativa pode ser comprovada, uma vez que as rupturas críticas obtidas em algumas seções para os cenários 1, 4 e 5 estão localizadas nos primeiros bancos do talude (sopé), podendo ser consideradas como rupturas rasas, diferentemente daquelas obtidas para os cenários 2 e 3 (maiores níveis de saturação dos filitos), que passaram a ser mais profundas e localizadas em bancos intermediários (imediatamente a montante dos filitos), submetidos a fluxos ascendentes.

Quando a condutividade hidráulica dos filitos foi majorada (cenários 4 e 5), obteve-se uma tendência geral de acréscimo de percolação nos filitos com o rebaixamento do NA e conseqüentemente o aumento dos coeficientes de segurança. Este comportamento pode ser justificado, também, pela baixa presença ou inexistência de fluxos ascendentes (por exemplo, a Figura 6). A única exceção a essa afirmativa é a seção SE-8850, da mina do Tamanduá, em decorrência do dique diabásio na base do talude (Figura 5). Porém, de modo geral, ressalta-se que os resultados destes cenários mostraram configurações da superfície freática incompatíveis com a realidade de campo, mas que foram aqui apresentados para análise das tendências.

Logo, a posição do NA é muito influenciada pela condutividade hidráulica do Filito Batatal. Quando esta é reduzida em 5 vezes (cenário 2) ou aumentada em 5 vezes (cenário 4), a posição do NA altera-se muito. Porém, o NA e os valores de F.S. variam menos entre os cenários 2 e 3 e também entre o 4 e o 5.

Os valores dos F.S. da seção SE-8850 da mina do Tamanduá (Quadro 5) possuem a mesma tendência entre os cenários. Mas esta seção apresenta uma particularidade em relação às demais, que é a presença de um dique de diabásio aflorando no fundo da cava e na primeira bancada do talude, que provoca condições de fluxo subterrâneo atípicas. As superfícies de rupturas críticas de todos os seis cenários analisados possuem formas semelhantes e estão mobilizando o primeiro talude inter-rampas que possui três bancadas constituídas de filitos dolomíticos e uma constituída de itabiritos argilosos, que está em contato com o dique. Os F.S. referentes às superfícies críticas dos cenários 2 e 3 (Quadro 5) são superiores devido ao reduzido fluxo subterrâneo ascendente nos itabiritos argilosos entre a camada de filitos dolomíticos e o dique. A delgada camada de itabiritos argilosos apresenta-se, ainda, em condições de menor saturação que os demais cenários. Nas situações em que as camadas de filitos são mais permeáveis, cenários 4 e 5, permitindo maior percolação de água por estas, há a possibilidade do aparecimento de condições de fluxos ascendentes no itabirito argiloso devido à barreira imposta pelo dique (cenário 4 da Figura 5), na qual em situações de fluxo ascendente a tensão efetiva passa a ser menor e tem como conseqüência a redução dos F.S..

As análises do cenário 6, com o fluxo horizontalizado (equipotenciais verticais), mostraram F.S. similares às do cenário 1. Porém, nas situações em que há elevadas componentes verticais de fluxo, os F.S. do cenário 6 tendem a variar significativamente se comparado com os daquele

cenário. Esta questão está diretamente relacionada com as componentes verticais de fluxo, ignoradas no cenário 6. Desconsiderando-se os fundos das cavas (“bottom pit”), com menor suscetibilidade a escorregamentos devido a maior resistência dos maciços rochosos aí encontrados na cava final (na Formação Cauê), fluxos ascendentes no cenário 1 só foram identificados nos taludes da mina Tamanduá imediatamente a montante do filito sericítico da Formação Batatal. O maior F.S. no cenário 6 nas seções desta mina se deve a desconsideração dos fluxos ascendentes, levando a uma superestimação do F.S.. Nos casos em que o valor adotado de condutividade hidráulica do filito Batatal foi mais baixo (cenários 2 e 3) este problema se mostrou ainda mais grave, pois as subpressões foram mais expressivas. Nestes casos, a prática usual em análises de estabilidade por equilíbrio-limite de se considerar o potencial hidráulico constante na vertical pode levar a um subdimensionamento dos F.S..

Como previsto pela teoria, variações de condutividade hidráulica em contatos litológicos levam a refração das linhas de fluxo (por exemplo, cenário 4 da Figura 6). Estas pequenas refrações podem proporcionar localmente fluxos com componentes ascendentes e acarretar pequenos movimentos de massa, não analisados neste estudo.

Dependendo da disposição espacial das camadas geológicas menos permeáveis, situações locais de fluxo ascendente podem se desenvolver, com redução das tensões efetivas pela força de percolação e, conseqüentemente, do fator de segurança dos taludes. Diminutas variações da condutividade hidráulica do maciço filítico podem suscitar elevação do NA, proporcionando também a redução do nível de segurança do talude.

Fluxos não saturados subverticais podem levar à diminuição do efeito da coesão aparente em maciços de baixa qualidade geomecânica. Porém, o programa SLOPE/W® não considera esta influência em sua rotina numérica. Com a elevação da saturação há também o aumento do peso específico do maciço. Esses processos podem reduzir as condições de segurança e resultar na ruptura do talude. Em maciços com maior grau de saturação, normalmente, a superfície de ruptura crítica passa a ser mais profunda que as superfícies configuradas em maciços drenados.

5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste estudo efetuou-se análise paramétrica da possível influência das unidades pouco permeáveis da Formação Batatal nas condições de fluxo e de estabilidade. Cabe lembrar que o grande número de variáveis e incertezas dificultou o perfeito entendimento das reais influências no fluxo e na estabilidade de taludes. Mesmo com todas estas ressalvas, é possível concluir que:

- A análise da condição de estabilidade acoplada com os resultados da análise de percolação se mostrou eficaz para alcançar o objetivo principal proposto;
- A utilização de curvas características de condutividade indiretamente estimadas é preferível a assumir-se recarga uniformemente distribuída por todas as unidades geológicas, conforme a prática usual em modelagens de fluxo hídrico;
- O emprego dos valores de condutividade obtidos por retroanálise de estudos hidrogeológicos prévios (cenário 1) em modelos bidimensionais de fluxo sugere uma percolação considerável pela Formação Batatal. Este fluxo nem sempre é notado nos taludes das minas devido ao expressivo rebaixamento da superfície freática provocado pelas camadas de alta condutividade da Formação Cauê, pelo gradiente hidráulico elevado na Formação Batatal e, também, pelas unidades de metachert no interior desta formação. Os dados de piezômetros e de indicadores de nível de água em algumas das minas sugerem que algum grau de conexão

pode efetivamente existir por esta formação. Este fluxo tende a ocorrer espacialmente concentrado ao longo de falhas ou fraturas, por exemplo, e não difuso pela matriz rochosa, como assumido neste estudo. Contudo, levantamentos geomecânicos efetuados em outras minas de ferro da região do Quadrilátero Ferrífero (e.g.: Scarpelli, 1994) indicam que o espaçamento médio das diversas famílias de descontinuidades chega a ser decimétrico, reforçando a hipótese adotada e viabilizando a adoção do conceito dos meios de porosidade equivalente (Bear e Verruijt, 1987);

- Os fatores de segurança dos taludes se mostraram fortemente dependentes da condutividade hidráulica do filito Batatal, já que pequenas mudanças de seus valores proporcionaram variações expressivas no nível de segurança;
- As componentes verticais ascendentes de fluxo são relevantes para o nível de segurança de taludes e estas podem condicionar rupturas locais. Rupturas de maior dimensão são geralmente pouco afetadas por tais componentes, ao menos para as condições aqui assumidas, exceto a seção SE-8850 da mina do Tamanduá, que apresenta uma situação atípica, configurada por um dique de rocha básica;
- Da mesma forma, componentes verticais descendentes de fluxo, como as provocadas por camadas muito condutivas, como os metacherts, tendem a rebaixar a superfície freática e a aumentar significativamente os fatores de segurança;
- O fluxo hídrico subterrâneo obedece alguns princípios básicos da geotecnia, percolando pela trajetória que exige depender menor energia. Logo, há maior concentração deste em trechos com espessuras menores de camada com permeabilidade reduzida, conforme verificado nas análises desenvolvidas;
- Em situações onde há carga hidráulica elevada a montante de camadas de baixa condutividade desenvolvem-se gradientes hidráulicos elevados no interior dessas camadas e, em algumas situações, surgências de água no contato entre ambas;
- Com o aumento da condição de saturação, há, também, o aumento do peso específico, reduzindo as condições de segurança para a maioria dos casos e condicionando a posição e característica geométrica da ruptura crítica. Em maciços com maior grau de saturação, maior ângulo de inclinação do talude e menores parâmetros de resistência, a superfície de ruptura crítica passa a ser mais profunda;
- Muitas questões envolvendo as possíveis influências de barreiras hidráulicas no padrão do fluxo hídrico subterrâneo e na estabilidade dos taludes globais de cava a céu aberto ainda demandam maiores aprofundamentos. Em estudos futuros, recomenda-se um levantamento de detalhe em campo das descontinuidades no filito da Formação Batatal para serem tratados e aplicados em modelamentos de fluxos subterrâneo. Seria igualmente importante refinar o modelamento hidrogeoquímico e isotópico para melhor avaliar o grau de conectividade hídrica entre os aquíferos Moeda e Cauê, via Formação Batatal.

6 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a VALE pelo apoio em fornecer dados e informações para a realização do estudo nas suas minas Tamanduá, Pico e Capitão do Mato, e a colaboração inestimável e essencial ao trabalho.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alkmin, F. F.; Marshak, S. (1998). *Transamazonian orogeny in the Southern São Francisco Craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero*. Precambrian Research, 90: 29-58.
- Bear, J.; Verruijt, A. (1987). *Modeling Groundwater Flow and Pollution*. D.Reidel Publishing Company, 1987, 413 p.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classification*. New York: John Wiley. V. 15, pp. 335-344.
- Bishop, A. W. (1955). *The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes*. Géotechnique, vol. 5, pp. 7-17.
- Dorr, J. V. N. (1969). *Physiographic, Stratigraphic and Structural Development of the Quadrilátero Ferrífero, Brazil*. U. S. Geol. Survey, Washington. 110 p.
- Fredlund, D. G.; Xing, A. (1994). *Equations for the soil-water characteristic curve*. Canadian Geotechnical Journal, 31 (3): 521-32.
- Freeze, R. A.; Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. New Jersey: Prentice – Hall. 604 p.
- Guidicini, G., Nieble, C. M., Cordinides, A. T., Berrino, S. E.; Rodrigues, J. D. (1972). *Um método de classificação geotécnica preliminar de maciços rochosos*. In: Semana Paulista de Geologia Aplicada, 4, São Paulo. Anais. São Paulo: ABGE, v. 3, pp. 285-331.
- IPT (1984). *Estudos Geológico-geotécnicos para caracterização e classificação de maciços rochosos para projetos de engenharia (túneis, lavra a céu aberto, e barragens)*. Instituto de Pesquisas Tecnológicas. São Paulo. (IPT – Relatório, 19569).
- Janbu, N. (1968). *Slope Stability Computations*. Soil Mechanics and Foundation Engineering Report. Technical University of Norway, Trondheim.
- Liu, H. H., Bodvarsson, G. S.; Hudson, D. (2002). *Large-scale Constitutive Relationships for Unsaturated Flow in Fractured Rocks*. Lawrence Berkeley National Laboratory Berkeley, CA e U.S. Geological Survey Sacramento, CA. 11 p.
- MDGEO (2005a). *Relatório do modelo numérico do fluxo d'água subterrânea da Mina do Tamanduá*. REL_MBR_TAM_05_05. Belo Horizonte: MBR, v.1.
- MDGEO (2005b). *Relatório do modelo numérico do fluxo d'água subterrânea da Mina Capitão do Mato*. REL_MBR_CMT_01_05. Belo Horizonte: MBR, v.6.
- MDGEO (2005c). *Relatório do modelo numérico do fluxo d'água subterrânea da Mina do Pico*. REL_MBR_PIC_011_05. Belo Horizonte: MBR, v.1.
- Morgestern, N. R.; Price, V. E. (1965). *The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces*. Geotechnique, vol. 15, pp. 79-93.
- OPGPM – Ouro Preto Geologia e Pesquisa Mineral Ltda. (2005) *Geologia Estrutural da Mina Capitão do Mato – MBR*. Nova Lima-MG, pp. 2-28.
- Patton, F. D.; Hendron Junior, A. J. (1974). *General report on Mass Movements*. In: Int. Congress of the IAEG, 2th, 1974, São Paulo. Proc. São Paulo: ABGE. v.2, pp. 1-57.

- Scarpelli, A. G. (1994). *Classificação Geomecânica Aplicada a Avaliação da Estabilidade de Taludes em Minas de Ferro do Quadrilátero Ferrífero*. Dissertação de Mestrado. São Carlos-SP, USP, 187 p.
- Silva, E. M. (2006). *Análise de estabilidade de taludes em solos de alteração de rochas metamórficas do quadrilátero ferrífero*. Dissertação de Mestrado. Viçosa-MG, UFV, pp. 38-87.
- Snow, D.T. (1969). *Anisotropic permeability of fractured media*. Water Resources Research 5(6), 1273–1289.
- Suckau, V. (2005). *Relatório de reavaliação de reservas das minas Tamanduá e Capitão do Mato*. Relatório para o DNPM.
- Ventura, L. C. (2009). *Análise da influência de barreiras hidráulicas no padrão do fluxo e na estabilidade de taludes de cavas a céu aberto de minas de ferro do Quadrilátero Ferrífero, MG*. Dissertação de Mestrado. Núcleo de Geotecnia, Escola de Minas, UFOP. Ouro Preto, pp. 10-221.
- Zea Huallanca, R. H. (2004). *Mecanismo de ruptura em taludes altos de mineração a céu aberto*. Dissertação de Mestrado. São Carlos, USP, pp. 3-32.