

ESTUDO DE ESTABILIDADE DE TALUDES NA MINA DE SÃO LUÍS EM CATAS ALTAS/MG COMBINANDO SIG E MÉTODOS DE INVESTIGAÇÃO USUAIS

Slope stability study of São Luís mine located in Catas Altas/MG
combining GIS and usual investigation methods

Ítalo Prata de Menezes*
Oswaldo Augusto Filho**

RESUMO – Métodos de estudo de estabilidade de taludes estão bastante desenvolvidos e consolidados na Geologia de Engenharia. Paralelamente, a aplicação de ferramentas de geoprocessamento tem-se intensificado em todos os campos de conhecimento técnico-científico. Neste contexto, este trabalho objetivou desenvolver uma abordagem de estudo para caracterizar a estabilidade de taludes de mineração combinando técnicas de geoprocessamento e métodos usuais de análise geológico-geotécnica. A investigação ocorreu em duas escalas de trabalho: primeiramente uma caracterização semi-regional utilizando SIG (Sistema de Informação Geográfica) e mapas temáticos e, posteriormente, uma análise de detalhe utilizando estereogramas e cálculo de fatores de segurança determinísticos pelo método de equilíbrio-limite. A caracterização semi-regional permitiu uma compreensão da área de entorno da mina, através de parâmetros como a declividade, curvatura e a direção de vertente. As análises por estereogramas indicaram várias situações de instabilidade, sendo estas feições identificadas em campo, confirmando a susceptibilidade a estes tipos de ruptura. Da mesma forma, as análises por equilíbrio-limite apontaram fatores de segurança menores para rupturas pequenas, que afetavam poucos taludes.

SYNOPSIS – Analysis methods of slope stability are highly developed and consolidated in Engineering Geology. In addition, the application of GIS (Geographic Information System) tools has been intensified in all fields of technical-scientific knowledge. In this context, this study aimed to develop an approach to characterize the stability of mining slopes combining GIS techniques and traditional methods of geological geotechnical analysis. The investigation was developed in two scales of work: firstly, a semi regional characterization using GIS and thematic maps and, secondly, a detailed analysis, which used stereograms and limit-equilibrium. The semi-regional characterization allowed an understanding of the area surrounding the mine, through parameters such as slope, curvature and direction of slope. The stereogram analyses indicate various situations of instability whose features are identified in the field, confirming the susceptibility to these types of rupture. Similarly, the limit equilibrium analyses showed lower safety factors for small slides, which affected only a few slopes.

PALAVRAS CHAVE – Estabilidade de taludes, estereogramas, equilíbrio limite.

* Mestre em Geotecnia, EESC, Universidade de São Paulo. E-mail: italoprata@yahoo.com.br

** Professor Associado, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos – EESC-USP.
Email: oafilho@sc.usp.br

1 – INTRODUÇÃO

A utilização das ferramentas de geoprocessamento tem-se intensificado nos diferentes campos do conhecimento técnico-científico e áreas de aplicação e, em particular, no estudo de escorregamentos e processos correlatos a instabilização de taludes. Particularmente, os mapas de declividade, direção de vertente e curvatura fornecem informações importantes para a caracterização de uma área, principalmente relacionado a estudos de estabilidade. A exemplo, quanto maior a declividade maior será a parcela da componente tangencial do peso do material, favorecendo a instabilização. As declividades mais acentuadas também aumentam a energia cinética da água no escoamento superficial, induzindo o desenvolvimento de feições de instabilização na encosta ou talude (Lopes, 2007).

A curvatura permite compreender, entre outros fatores, as características da drenagem e os processos de erosão e escoamento da região. Somado a isto, o conhecimento das direções das vertentes permite também uma melhor compreensão do sistema de drenagem da região, indicando o principal sentido que a água irá percorrer e, no caso de ocorrer movimentos de massas, prever qual o sentido que o material irá percorrer, permitindo a tomada de ações preventivas.

Reis (2010) destaca ainda que as análises de estabilidade em taludes de mineração necessitam de uma ampla e abrangente investigação geotécnica das litologias locais, a clara definição prévia dos mecanismos de rutura potencialmente susceptíveis de ocorrer e os riscos e efeitos resultantes de uma eventual rutura.

Segundo Hoek e Bray (1981) os mecanismos de rutura em maciços rochosos são fortemente condicionados pelas características das descontinuidades (principalmente atitude e persistência) e por suas relações geométricas com o plano do talude. Desta forma, as ruturas mais comuns em maciços rochosos são as ruturas planares, em cunha e tombamentos. Estes autores destacam que ruturas circulares, apesar de serem típicas em solos, também podem ocorrer em maciços rochosos, quando estes se apresentam bastante fraturados.

Neste contexto, a utilização de estereogramas permite representar a relação espacial entre as atitudes das descontinuidades presentes no maciço, assim como a atitude do talude, auxiliando a previsão da geometria mais provável de instabilização para cada situação. Hoek e Bray (1981) e Goodman (1989) indicam em seus trabalhos os critérios a serem analisados para a verificação da possibilidade de ocorrer rutura utilizando projeção estereográfica. Complementando o estudo de estabilidade podem ser calculados fatores de segurança determinísticos do tipo equilíbrio-limite para avaliar a estabilidade dos taludes na mina.

2 – MATERIAIS E ETAPAS DE TRABALHO

2.1 – Caracterização da área de estudo

A área em estudo fica localizada na porção centro este de Minas Gerais, no município de Catas Altas e pertence à Empresa VALE S.A.. São ao todo três as minas que se situam na área investigada: a mina de Almas, a Tamanduá e a São Luís. Atualmente, apenas a mina de São Luís se encontra em atividade, sendo a maior entre as três.

As minas estão inseridas no Quadrilátero Ferrífero, situado no extremo sul do Cráton São Francisco contendo abundantes mineralizações de ferro e outros recursos minerais. Segundo Alkmim e Marshak (1998) a litoestratigrafia do Quadrilátero é composta por quatro unidades: Complexos Metamórficos, Supergrupo Rio das Velhas, Supergrupo Minas e o Grupo Itacolomi. A coluna estratigráfica do Quadrilátero está apresentada na Fig. 1.

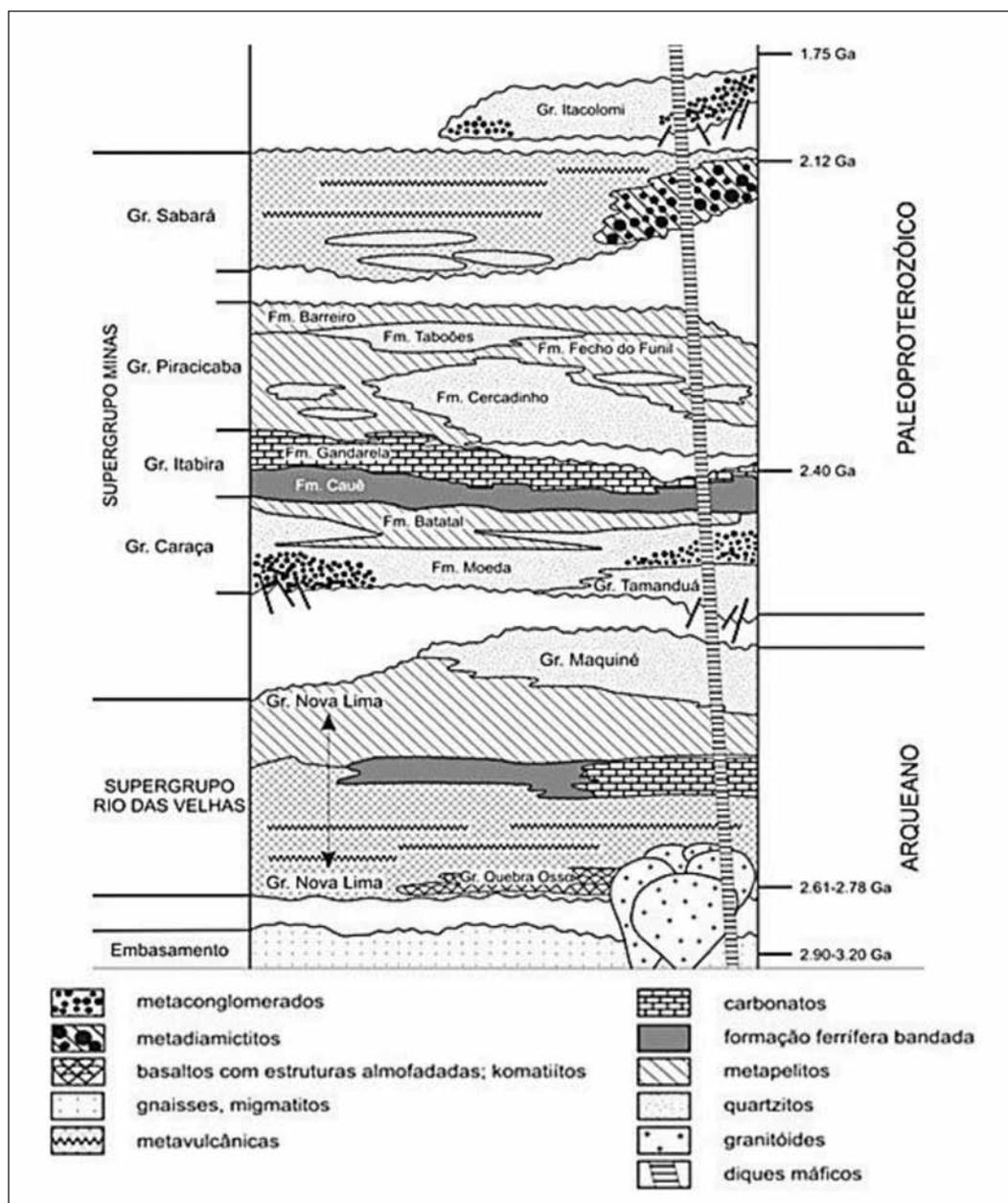


Fig. 1 – Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero (Modificado de Alkmim e Marshak, 1998).

Na área em questão afloram as rochas do Supergrupo Rio das Velhas, Supergrupo Minas e Coberturas Cenozóicas, que geralmente correspondem à canga e depósitos aluvionares. O Supergrupo Rio das Velhas apresenta-se na região representado pelo Grupo Quebra-Ossos, constituído predominantemente por clorita-talco-xistos com níveis de serpentinitos, representando a clássica sequência de lavas ultramáficas komatiíticas arqueanas do *greenstone belt* do Quadrilátero Ferrífero. Já o Supergrupo Minas pode ser subdividido nos grupos Caraça (Formação Moeda e Batatal), Itabira (Formação Cauê) e Piracicaba Indiviso.

Geneticamente, o Grupo Caraça é composto por sedimentos clásticos depositados em ambiente de caráter fluvial evoluindo para marinho transgressivo e retornando para fluvial, e finalizando com uma deposição em ambiente marinho-plataformal (Renger *et al.*, 1993).

O Grupo Itabira é formado por sedimentos químicos e carbonáticos depositados em uma fase sedimentar caracterizada por um decréscimo no aporte de material terrígeno.

O Grupo Piracicaba é constituído por sedimentos clásticos e químicos representando um depósito do tipo deltaico originado a partir de uma sequência regressiva interrompida por uma fase transgressiva (Moraes, 1985).

A formação Cauê é a litologia predominante na área das minas, sendo o bem mineral explorado. As rochas encaixantes deste litotipo variam ao longo do corpo do minério, sendo que na mina São Luís as encaixantes predominantes são os xistos do grupo Quebra-Ossos a oeste e os filitos e quartzitos do grupo Piracicaba a leste. Na mina de Tamanduá/Almas as encaixantes do corpo de minério pertencem ao grupo Caraça, composto por filitos e quartzitos.

A área de estudo é delimitada a leste por gnaisses e a oeste pelos quartzitos do Grupo Caraça, que formam a Serra do Caraça.

Ao longo da área há a presença de coberturas de canga e de depósitos antrópicos, constituindo materiais rolados ou pilhas de estéril.

2.2 – Caracterização em escala semi-regional

A base topográfica fornecida pela VALE S.A. apresentava diferentes espaçamentos entre as curvas de nível. O primeiro passo foi dirigido a consolidação destes dados para a elaboração da base topográfica digital.

A princípio as curvas de nível foram adaptadas manualmente, para obter o melhor ajuste entre as mesmas. Em sequência foi gerado um MDT (modelo digital de terreno) do tipo TIN (triangular irregular network) utilizando o pacote de funções do *ArcGIS*. Este TIN foi transferido para o formato *raster*, sendo então utilizado para gerar as curvas de nível com espaçamento de 5 em 5 metros. Contudo este modelo ainda apresentava incoerências, indicando altas declividades onde visualmente o relevo era plano, entre outras. Foi realizado um novo ajuste manual destas curvas, removendo estas falhas e, posteriormente, foi elaborado um novo MDT.

Este novo MDT serviu de base para gerar a base topográfica final para a região e os mapas temáticos neste estudo, sem apresentar os defeitos que foram verificados nas bases topográficas anteriores.

2.2.1 – Validação do MDT

O MDT elaborado foi validado por dois métodos distintos: uma validação qualitativa e uma quantitativa. A primeira foi realizada gerando curvas de nível de 5 em 5 metros e sobrepondo às curvas de nível originais, sendo feito uma verificação visual entre o encaixe das mesmas.

Para a validação quantitativa foi gerada uma malha de pontos espaçados de 500 metros sobre toda a área investigada e aferidos os valores de cota das curvas de nível originais e os valores obtidos através do MDT elaborado. Através destes valores foi calculado o *Root Mean Square Error* (RMS) utilizando a equação 1 (Silva, 1999). Esta malha de pontos foi designada para realizar a validação de um mapa em escala semi-regional, para remover os erros que pudessem ser detectáveis em um mapa na escala de 1:10 000.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum (Z_0 - Z_1)^2}{N}} \quad (1)$$

Z_0 – valor de cota da topografia inicial;

Z_1 – valor de cota obtido do MDT;

N – número de pontos amostrados.

2.2.2 – Elaboração dos mapas temáticos

Para a delimitação das bacias hidrográficas e a rede de drenagens foi empregado o pacote de funções disponibilizado no programa *ArcGIS*. Os resultados obtidos através destes mapas foram balizados com a topografia e a imagem de satélite da região, juntamente com a rede de drenagem disponibilizada pela Vale.

Foi gerado o mapa de declividade da área e o mesmo foi subdividido em 3 intervalos distintos: declividade baixa (0° a 17°), declividade moderada (17° a 30°) e alta declividade (30° a 72°).

O mapa de curvatura foi dividido em três tipos: côncava, plana e convexa, utilizando para a individualização de superfícies planas o intervalo contido entre 1% do valor máximo e mínimo de curvatura encontrado para a área.

Para entender melhor os fluxos de água na área foi gerado o mapa de direção de vertente que mostra o fluxo descendente em cada célula. A Fig. 2 apresenta um fluxograma com os passos adotados para a geração dos mapas temáticos.

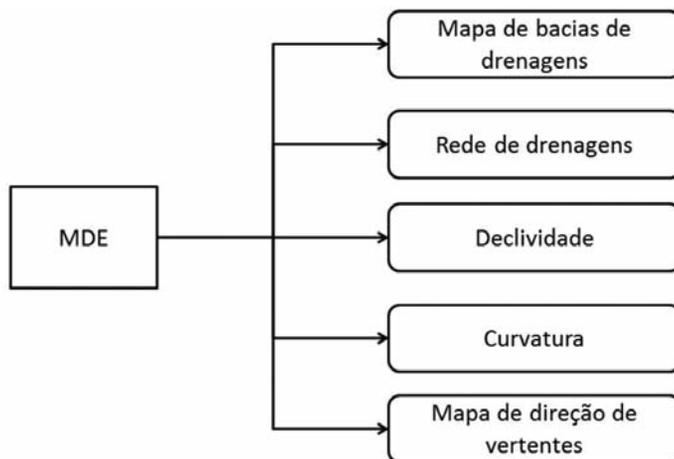


Fig. 2 – Fluxograma de geração dos mapas temáticos.

2.3 – Caracterização em escala de detalhe

2.3.1 – Seleção da mina para estudo de detalhe

A partir da análise dos mapas temáticos, juntamente com os dados de campo, foi selecionada uma cava para prosseguir com as análises de detalhe. Alguns dos critérios utilizados foram:

- Maior mina do complexo;
- Apresenta diferentes direções de vertentes, ou seja, maior variação na direção dos taludes podendo ser analisadas diferentes seções com ângulos de taludes diferentes;
- Única mina em atividade no período em que esta pesquisa foi realizada, consequentemente apresentando os taludes e bancadas em melhores condições;
- Mina que apresenta a maior quantidade de dados estruturais adquiridos;
- Apresenta valores de declividades mais elevados.

2.3.2 – Definição das seções para o estudo de detalhe

Foram definidas três seções, com o objetivo de cobrir toda a extensão da mina analisada. Estas seções foram traçadas perpendicularmente às direções de taludes possibilitando a realização de análises sobre o comportamento das principais descontinuidades presentes no maciço, considerando algumas das diferentes direções de taludes que ocorrem ao longo da mina em questão.

2.3.3 – Investigações de campo

Os trabalhos de campo foram realizados em duas etapas. Ao longo da primeira etapa foram marcados pontos de 50 em 50 ou de 100 em 100 metros, onde foi realizado o levantamento do grau de resistência e alteração, da direção e mergulho do talude, do bandamento e das principais descontinuidades presente em cada ponto. A segunda etapa de campo foi realizada após as análises semi-regionais e teve foco no mapeamento de seções pré-estabelecidas na mina de São Luís, objetivando realizar um estudo de estabilidade de taludes. Nesta segunda parte foi utilizada a classificação do perfil de alteração proposta por Vaz (1996), apresentada no Quadro 1.

Quadro 1 – Classes de perfil de alteração propostas por Vaz (1996).

Classe	Descrição	Método	
		Escavação	Perfuração
SE	Solo eluvial	Lâmina de aço	Trado ou percussão
SA	Solo de alteração	Lâmina de aço	Trado ou percussão
RAM	Rocha alterada mole	Escarificador	Percussão com lavagem
RAD	Rocha alterada dura	Explosivo	Rotativa
RS	Rocha sã	Explosivo	Rotativa

Os parâmetros geotécnicos utilizados foram baseados nos relatórios de Geoestrutural (2005), e estão resumidos no Quadro 2.

Quadro 2 – Parâmetros de projeto fornecidos pela VALE S.A. e adotados neste estudo.

Litotipo	Classe de alteração (Vaz, 1996)	Peso específico (kN/m ³)	Envoltória de resistência efetiva			
			Paralelo à foliação		Oblíquo à foliação	
			c' (kN/m ²)	φ' (Graus)	c' (kN/m ²)	φ' (Graus)
Formação Cauê (Itabiritos silicosos)	RAM	30	30	30	80	38
	RAM/RAD	30	30	32	150	40
	RS	30	-	-	300	45

2.3.4 – Análises com o emprego de projeção estereográfica

A partir dos dados coletados em campo das estruturas presentes no maciço foram confeccionados estereogramas das estruturas geológicas apresentando as principais direções das juntas e dos planos de bandamento e foliação. Baseado nas interações destas estruturas com os planos de talude principais foram avaliadas as possibilidades de ocorrências de instabilidades, segundo os métodos propostos por Hoek e Bray (1981) e Goodman (1989).

2.3.5 – Análise pelo método de equilíbrio limite

Para análise de rutura pelo método de equilíbrio limite foi selecionada a seção 3 dentre as três realizadas. Esta seção foi escolhida utilizando as informações obtidas durante as etapas de campo, objetivando simular uma situação mais crítica para o estudo.

Foram utilizados os programas WinStabl e Slide para as análises, considerando 3 cotas piezométricas distintas devido à escassez de dados de nível de água na área. Para o WinStabl foram pesquisadas 50 superfícies de rutura, sendo que o programa indica as 10 mais críticas. Já utilizando o Slide, a pesquisa de superfícies de rutura foi mais abrangente, atingindo até 5000 superfícies diferentes. Os fatores de segurança para ambos os programas foram calculados a partir dos métodos de Janbu simplificado e de Bishop.

3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 – Análise semi-regional

3.1.1 – Validação do MDT

A partir do procedimento de edição da base topográfica disponível, foi elaborado um novo MDT para a região. O processo de edição e adequação das curvas de nível produziu um MDT contínuo, sem variações abruptas de cotas como ocorria ao longo das junções das diferentes topografias fornecidas.

3.1.1.1 – Validação qualitativa

A análise qualitativa apresenta uma boa coincidência do traçado entre a topografia original e a interpolada a partir do MDT, sendo que alguns pequenos desvios são provenientes apenas pelo processo de suavização das curvas de nível. A Fig. 3 apresenta esta comparação em um setor da área investigada.

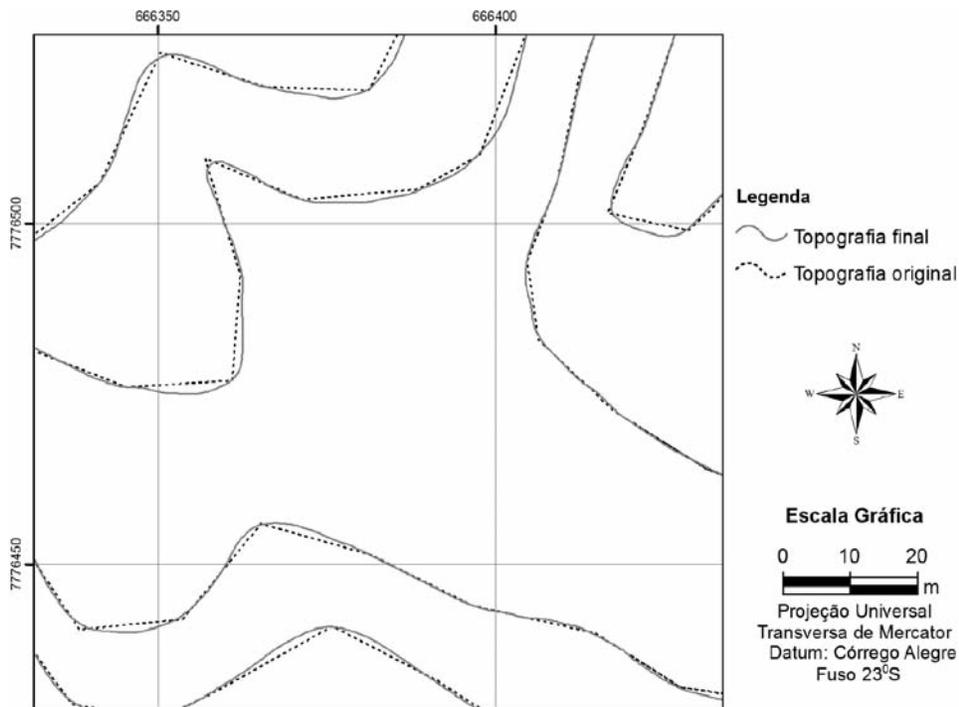


Fig. 3 – Trecho da área investigada mostrando curvas de nível de 5 em 5 metros originais e após ajustes no MDT.

3.1.1.2 – Validação por métodos quantitativos

Pela análise quantitativa, foi obtido um RMS médio de 0,739. Contudo, analisando individualmente o RMS, observa-se que poucos pontos tiveram uma variação muito grande entre os valores de cota finais e iniciais, como pode ser observado pelo gráfico da Fig. 4.

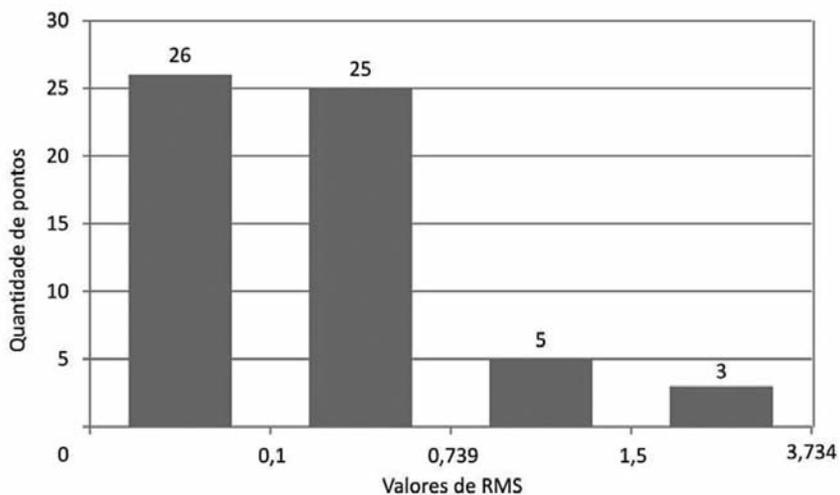


Fig. 4 – Histograma apresentando a quantidade de pontos inseridos em alguns intervalos de valores de RMS.

Dos 59 pontos amostrados, 51 apresentam RMS individuais inferiores ao valor médio e, em 26 pontos, a variação é igual ou inferior a 0,1 metros. Apenas 8 pontos possuem valores de RMS superiores ao valor médio calculado, concluindo-se então que uma pequena quantidade de pontos apresenta valores de RMS elevados, aumentando consideravelmente o RMS médio.

Analisando a distribuição dos pontos com altos valores de RMS, verificou-se que eles estão concentrados dentro das minas e na área administrativa, onde os dados topográficos disponíveis são por pontos cotados.

3.1.2 – Mapas temáticos

3.1.2.1 – Mapa de bacias hidrográficas

Utilizando o SIG foram identificadas 6 bacias hidrográficas, nomeadas a partir de sua posição relativa na área pesquisada e apresentadas na Fig. 5. Observa-se que a própria área da mina São Luís serve como um divisor de águas local, estando seus limites próximo da divisão da bacia sudoeste e centro. Além disto, está inserida em duas bacias que vertem para leste. A mina de Tamanduá/Almas tem a maioria de sua área inserida na bacia central, no quais águas vertem praticamente leste e são captadas por uma barragem. A extensão de cada bacia é apresentada no Quadro 3.

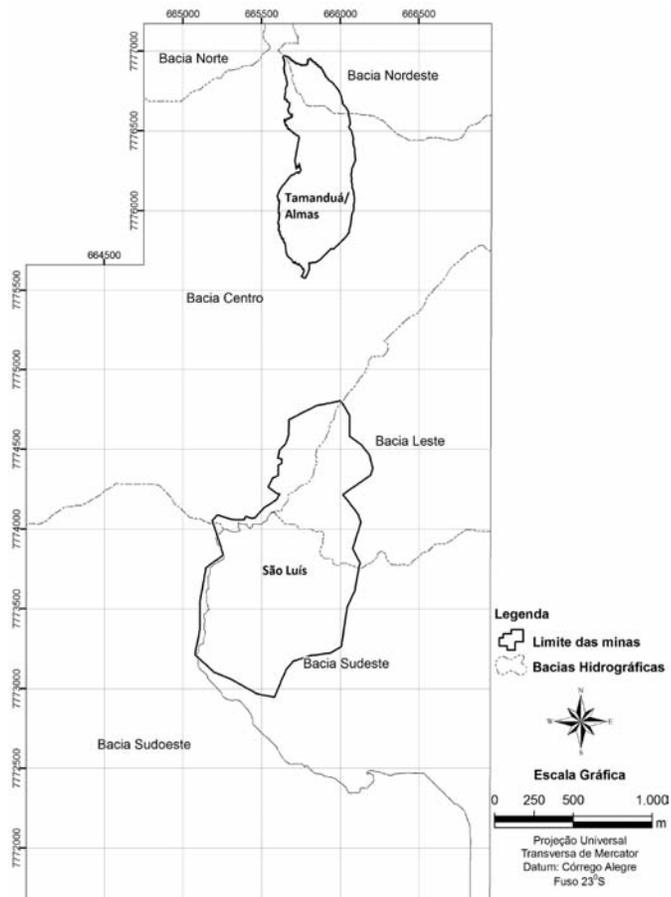


Fig. 5 – Mapa de localização das bacias hidrográficas.

Quadro 3 – Área de abrangência das bacias da região da mina e entorno.

Nome	Área	
	(m ²)	(%)
Nordeste	794 405	5,2
Centro	5 518 826	36,4
Leste	1 610 129	10,6
Sudoeste	4 359 905	28,7
Sudeste	2 590 075	17,1
Norte	296 419	2,0
<i>Total</i>	<i>15 169 759</i>	<i>100</i>

3.1.2.2 – Mapa de declividade

Foram definidas 3 faixas de intervalos contínuos de graus para a declividade, baseadas no valor mínimo e máximo obtido para a região estudada. Observa-se o predomínio do intervalo de declividade baixa na área estudada, principalmente na porção sul, e perfazendo 51,9% da área total. Valores de declividades altas concentram-se principalmente dentro das minas, caracterizando os taludes, e próximo a Serra do Caraça, que se localiza a oeste no mapa. O Quadro 4 aponta a área ocupada por cada um dos intervalos estabelecidos, e individualizando-os também por bacias hidrográficas.

Quadro 4 – Área e porcentagem referentes às diferentes declividades apresentadas na região.

Declividade	Área por bacia (%)						Área total	
	Norte	Nordeste	Leste	Centro	Sudoeste	Sudeste	(m ²)	%
0% - 17%	32,2	42,9	69,6	35,1	61,3	66,0	7 877 111	51,9
17% - 30%	49,3	40,9	22,4	42,8	21,8	24,7	4 784 240	31,5
30% - 72%	18,6	16,2	8,0	22,1	17,0	9,3	2 508 408	16,5

3.1.2.3 – Mapa de curvatura

Foi analisada a distribuição espacial deste atributo para a área total investigada e individualmente por bacias hidrográficas. Segundo o mapa de curvatura, superfícies planas são predominantes na região, representando 48,3% da área total, já encostas côncavas e convexas apresentam valores próximos, perfazendo 25,4% e 26,3%, respectivamente. O Quadro 5 a seguir resume os valores das áreas cobertas por cada tipo de vertente e suas porcentagens, incluindo os valores de porcentagens presentes em cada bacia hidrográfica.

Quadro 5 – Área e porcentagem dos tipos de curvatura presentes nos taludes e encostas da região.

Curvatura	Área por bacias (%)						Área total	
	Nordeste	Centro	Leste	Sudoeste	Sudeste	Norte	(m ²)	%
Côncavo	28,7	28,8	22,9	21,1	25,7	28,2	3 851 926	25,4
Plano	39,6	39,2	56,0	58,2	49,8	38,7	7 320 875	48,3
Convexo	31,7	32,0	21,1	20,7	24,5	33,1	3 996 958	26,3

O mapa de curvatura não apresenta uma boa consistência na área das minas, não sendo possível delimitar precisamente um padrão de taludes côncavos, planos e convexos. Deve-se isto à atividade antrópica constante e é dificultado pela escala da análise. Contudo, no entorno da mina, é possível identificar precisamente os perfis côncavos das encostas, que coincidem com o padrão de drenagem da área.

3.1.2.4 – Mapa de direção de vertente

Devido à presença da Serra da Canastra a oeste da área investigada, grande parte da drenagem verte para leste. Na área das minas a direção de fluxo apresenta-se um pouco mais difusa, devido a ser uma área com grande atividade humana. Contudo nesta região ainda é predominante o fluxo na direção leste e sudeste.

Analisando o Quadro 6, verifica-se que aproximadamente 57% da região possui vertentes nas direções leste, nordeste e sudeste, enquanto que cerca de 19% vertem para os lados opostos: oeste, noroeste e sudoeste. As direções norte e sul são responsáveis por 22,5% da área de drenagem, com cada uma destas direções correspondendo a aproximados 11% da área total.

Quadro 6 – Área coberta e porcentagem com direções de vertente na região de estudo.

Direção de vertente	Área por bacia (%)						Área total	
	Nordeste	Centro	Leste	Sudoeste	Sudeste	Norte	(m ²)	%
Norte	8,5	12,3	14,8	7,8	13,3	11,5	1 703 288	11,2
Nordeste	21,5	22,0	37,2	8,1	11,8	28,1	2 725 824	18,0
Leste	27,3	24,1	25,2	15,8	21,8	34,2	3 307 992	21,8
Sudeste	14,6	17,6	9,5	20,3	22,1	4,4	2 713 590	17,9
Sul	11,6	11,8	4,4	13,4	12,3	0,0	1 716 217	11,3
Sudoeste	7,9	4,2	1,6	11,1	7,3	0,1	991 802	6,5
Oeste	3,9	2,4	2,2	13,7	4,8	3,6	934 559	6,2
Noroeste	4,7	5,7	5,1	9,7	6,6	18,0	1 076 487	7,1

3.2 – Análise de detalhe

Na mina São Luís predomina RAM com nódulos de RAD/RS métricos. Estes nódulos estão distribuídos de forma aleatória, tanto em superfície quanto em profundidade, como mostram dados de sondagem. Devido aos grandes eventos tectônicos que afetaram esta região, as rochas que afloram na mina apresentam um elevado grau de deformação. Em alguns pontos as rochas encontram-se bastante deformadas, gerando estruturas em lápis.

Plotando as atitudes de bandamento coletados em campo verifica-se que o bandamento possui orientação geral N17°E; 53°SE. O bandamento é uma feição estrutural importante, presente em todo material. Contudo, esta feição é mais marcante nos itabiritos friáveis.

Os dados coletados de descontinuidades indicam 3 famílias de fraturas, A família mais marcante (F_1) apresenta atitude geral N85°W; 88°NE, com mergulho de alto ângulo variando entre norte e sul. A segunda família de fraturas (F_2) apresenta orientação geral N18°E; 42°SE e a terceira (F_3) N57°W; 66°NE.

Por fim, os taludes dentro da mina São Luís possuem orientações diversas, contudo apresentam uma atitude preferencial geral N17°E; 54°SE e secundária N66°W; 55°SW. Analisando os taludes em geral, observa-se que a inclinação praticada na mina fica entre 50° e 70°, totalizando aproximadamente 63% do total dos taludes, como pode ser observado pelo gráfico da Fig. 6.

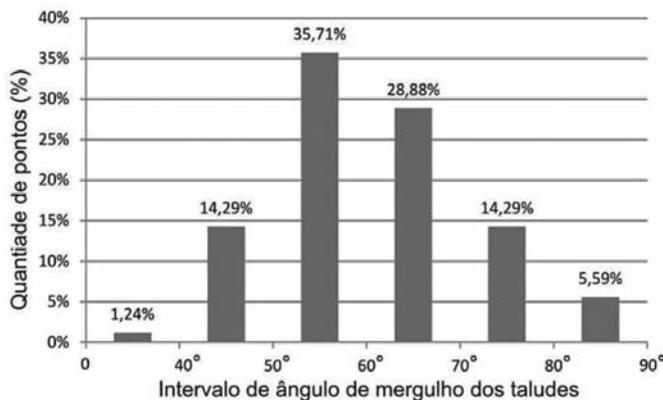


Fig. 6 – Gráfico da concentração de pontos por faixas de inclinação na mina de São Luís.

3.2.1 – *Ruturas planares*

Observa-se que na mina São Luís as atitudes das fraturas não representam um risco a este tipo de rutura, por não satisfazer a condição de paralelismo (o plano sobre o qual o deslizamento ocorre deve formar um ângulo não superior a 20°) às direções gerais dos taludes conforme o critério proposto por Hoek e Bray (1981).

Entretanto, a orientação do bandamento satisfaz esta condição em relação à orientação do talude T_1 (N17°E; 54°SE) e possui ângulo menor que o do mesmo. Desta forma este tipo de rutura é passível de acontecer, como pode ser observado pelo estereograma da Fig. 7. Além disto, o plano de fratura F_1 pode atuar como plano de liberdade para este tipo de deslizamento. Contudo, em campo não foram identificados deslizamentos desta natureza. O que se observa é um deslocamento centimétrico em alguns taludes, provavelmente devido as bandas serem milimétricas a centimétricas e ao espaçamento entre as fraturas da família F_1 ser relativamente pequeno. Como foi considerado a rutura planar ao longo do bandamento, o ângulo de atrito utilizado foi de 38°.

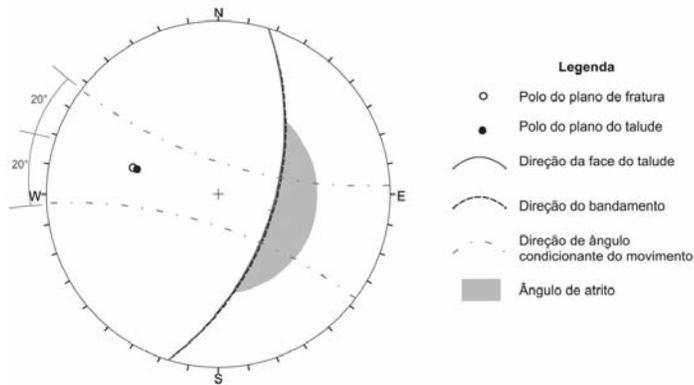


Fig. 7 – Análise de rutura planar para o talude T₁ (N17°E; 54°SE).

3.2.2 – Ruturas em cunha

Como mostra o estereograma da Fig. 8, para o talude T₂ (N66°W; 55°SW) não ocorre o risco de rutura deste tipo, já que as intersecções dos planos estão em direções opostas à direção da reta de maior declive deste talude.

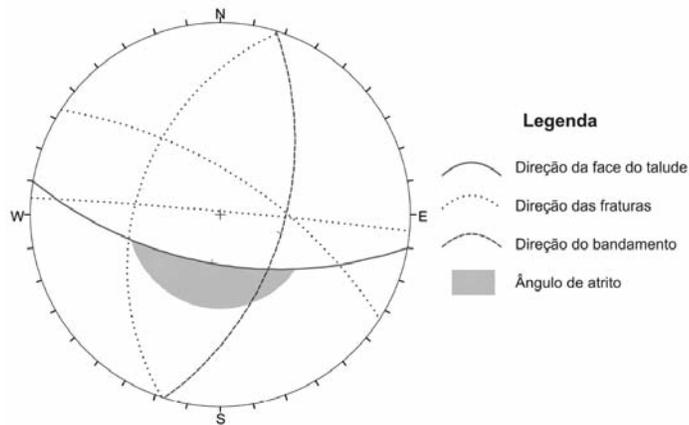


Fig. 8 – Análise de rutura em cunha para o talude T₂ (N66°W; 55°SW).

Entretanto, analisando o estereograma da Fig. 9, o talude T₁ que é o mais frequente na cava, apresenta intersecção de três planos capazes de gerar o deslizamento deste tipo.

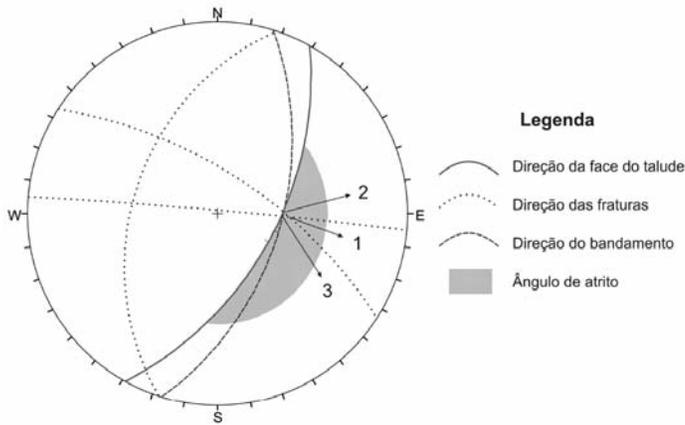


Fig. 9 – Análise de rutura em cunha para o talude T₁ (N17°E; 54°SE).

A linha de intersecção 1 possui direção S01°E; 49° e é gerada pelo plano de fratura N85°W; 88°NE com o N57°W; 66°NE. As outras direções de rutura são geradas pela intersecção destes planos com o bandamento e possuem direção N90°E; 52° (2) e S01°E; 52° (3).

As linhas de intersecções possuem direção e mergulho subparalelos ao talude. Isto faz com que a rutura também possua um alto valor de mergulho, o que aumenta a chance da rutura se dar de forma abrupta. O ângulo de atrito considerado nesta análise foi o mesmo adotado para ruturas paralelas ao bandamento (38°) devido a não se ter os valores de ângulo de atrito de cada família de fratura.

3.2.3 – Ruturas por tombamento

Analisando as famílias de descontinuidades principais e a orientação geral do bandamento, não há o risco de tombamento para o talude de atitude N17°E; 54°SE (Fig. 10), já que o polo de nenhuma descontinuidade encontra-se próxima ou inserida na área hachurada.

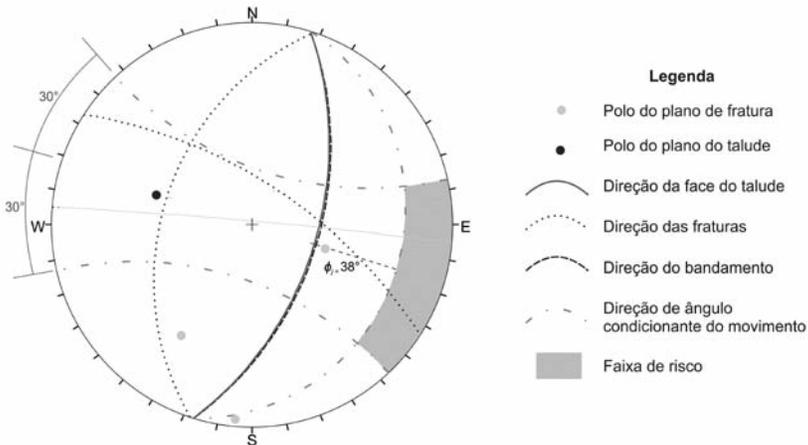


Fig. 10 – Análise de rutura por tombamento para o talude T₁ (N17°E; 54°SE).

Já para o talude T₂, a família de fratura F₁ oferece alto risco de tombamento, por estar inserida na área de risco. A família de fraturas F₃ oferece risco moderado, já que não se encontra inserida nesta área. Contudo, devido à proximidade do polo com esta faixa, a variação que ocorre ao longo da mina da atitude das fraturas e do talude pode gerar situações de instabilização (Fig. 11).

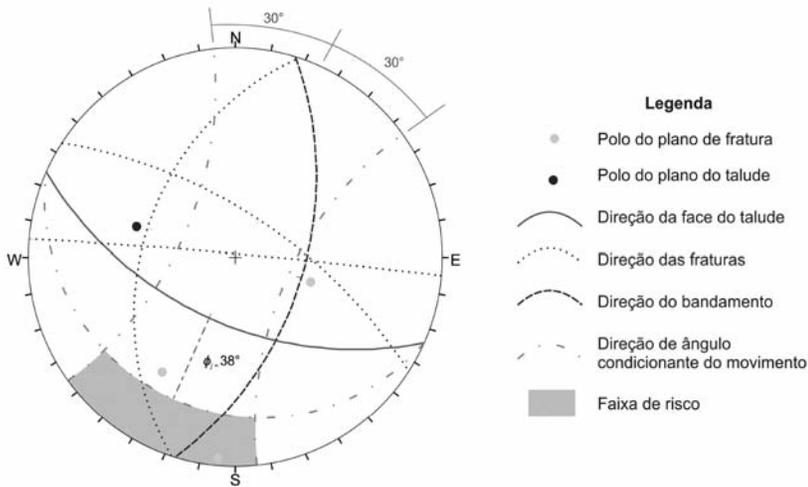


Fig. 11 – Análise de rutura por tombamento para o talude T₂ (N66°W; 55°SW).

3.2.4 – Análise de estabilidade de taludes pelo método de equilíbrio limite

Para as análises utilizando o método de equilíbrio limite, foi selecionada a seção 3. Esta seção possui direção aproximadamente perpendicular à orientação do bandamento, logo, esta estrutura apresentaria mergulho aparente o mais próximo do real. Também podemos adotar que, nesta seção, os esforços ao longo da rutura representam uma situação na qual os parâmetros de ângulo de atrito e coesão obtidos se encontram nas condições mais críticas, paralela à direção do bandamento.

Devido a escassez de informações sobre o nível de água, foram consideradas 3 situações distintas dentro da mina São Luís. Primeiramente, Geoestrutural (2005) indica que a cota do nível de água na mina de Tamanduá encontra-se em torno de 850 metros e adota este valor para os itabiritos desta área. Também foram simuladas análises de estabilidade para um aumento do NA para 950 e 1000 metros. Os resultados dos ensaios estão resumidos no Quadro 7.

Quadro 7 – Análises de estabilidade para a seção 3.

Classe maciço	Parâmetros			Nível de água (m)	Fatores de segurança mínimos			
	Relação com a foliação	c' (kN/m ²)	φ' (Graus)		WinStabl*	Slide*	Slide**	
							Janbu simplificado	Bishop simplificado
IV	Obliquo	150	40	850	2,72	2,72	2,56	2,76
IV	Paralelo	30	32	850	1,81	1,78	1,55	1,66
V	Obliquo	80	38	850	2,38	2,36	2,17	2,29
V	Paralelo	30	30	850	1,68	1,66	1,44	1,55
V	Paralelo	30	30	950	1,64	1,63	1,44	1,55
V	Paralelo	30	30	1000	1,42	1,33	1,00	1,14

*Pesquisa de 50 superfícies de rutura

**Pesquisa de 5000 superfícies de rutura

Ambos os programas indicaram superfícies de ruturas semelhantes, com FS próximos, validando as análises realizadas. As análises mostram fatores de segurança mais críticos para a ocorrência de ruturas menores, ou seja, aquelas que afetam poucas bancadas, como apresentado na Fig. 12. Este dado é corroborado pelas investigações em campo, onde foram identificadas apenas ruturas localizadas. Os principais processos de instabilização que foram identificados estão relacionados às famílias de fraturas que afetam o maciço, realçando a importância de uma análise cinemática utilizando estereogramas.

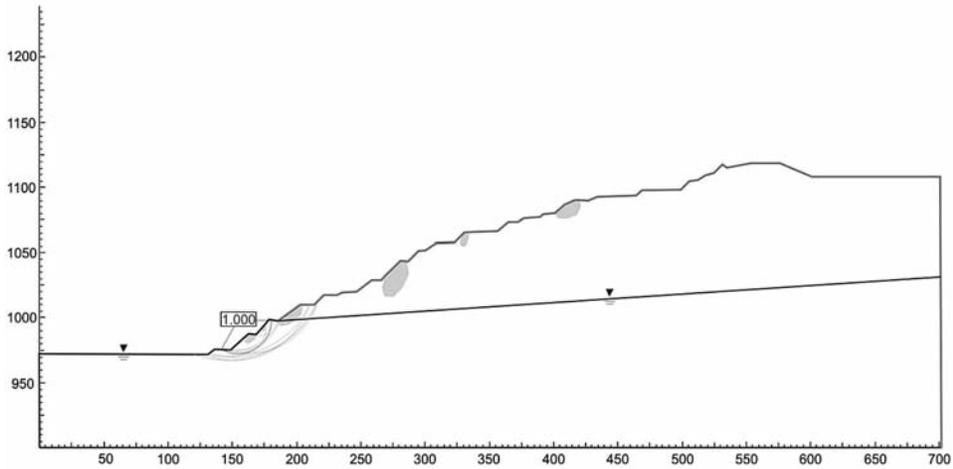


Fig. 12 – Pesquisa de superfícies utilizando Slide para NA na cota de 1000 metros.

4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método de análise utilizado possibilitou uma compreensão da área em que as minas se situam, fornecendo informações importantes para o planejamento do avanço da mina. O conhecimento das declividades da região, assim como o comportamento e as principais direções de vertentes, permite que sejam realizadas interferências sobre o ambiente de forma prática e direta, maximizando o tempo e recursos investidos e diminuindo impactos gerados sobre a natureza.

Analisando em estereogramas estas discontinuidades, juntamente com o bandamento e as principais direções de taludes, identificaram-se situações em que suas interações possibilitam a instabilização, seja tombamento, movimento em cunha ou deslizamento planar, sendo várias destas feições observadas em campo.

Foram realizadas apenas análises por equilíbrio limite investigando ruturas circulares, fato evidenciado pelas ruturas que foram identificadas ao longo da mina. Apesar do maciço apresentar anisotropia, o material se comporta principalmente como uma rocha extremamente alterada, sendo facilmente fragmentada pela pressão dos dedos. Desta forma, como o bandamento é uma superfície de fraqueza que ocorre em toda uma direção da rocha, é esperado que assim que a rutura tenha início, a superfície de rutura tende a seguir este plano preferencial, e por este motivo foi considerado o ângulo de atrito e coesão ao longo desta superfície. Apesar destas análises de estabilidade não especificarem necessariamente as superfícies de rutura mais prováveis, indicam o ponto mais provável de início da rutura e a quantidade de material mobilizado em um eventual deslizamento.

As análises por equilíbrio limite indicaram que os menores fatores de segurança apresentados são relativos a ruturas que afetam poucos taludes da cava. As ruturas que atingem toda a seção

analisada apresentaram fatores de segurança muito altos, indicando que é improvável que uma rutura deste tipo ocorra. Entretanto, mesmo sendo consideradas pequenas superfícies de instabilização, os valores de fator de segurança identificados foram relativamente altos, caso não ocorra a influência do nível de água. Isto corrobora com os resultados obtidos a partir da análise dos estereogramas, e o que foi identificado em campo. Comparando os métodos simplificados de análise, o método de Janbu apresentou valores de FS inferiores ao método de Bishop. Além disto, ambos os métodos indicaram menor valor do FS para superfícies distintas, reforçando a importância da utilização de diferentes abordagens no estudo de caracterização da estabilidade.

Comparando os resultados obtidos, o presente método atendeu aos objetivos propostos, dentro da intenção deste trabalho que é a caracterização e estudo de estabilidade de taludes por diferentes abordagens, envolvendo uma análise do contexto semi-regional da mina e uma caracterização de detalhe.

5 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a VALE S.A. por ceder gentilmente as informações utilizadas nesta pesquisa.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alkmim, 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, v.90, pp. 29-58.
- Geoestrutural (2005). *Complexo Fazendão Mina São Luís Tamanduá-Almas. Análises de estabilidade dimensionamento dos taludes*. Relatório técnico interno. Catas Altas, MG. 90 p.
- Goodman, R.E. (1989). *Introduction to rock mechanics*. 2nd ed., John Wiley & Sons, New York. 562p.
- Hoek, E.; Bray, J.W. (1981). *Rock Slope Engineering*. Institute of Mining and Metallurgy, London.
- Lopes, A.P.R. (2007). *Mapeamento do potencial de instabilização de taludes rodoviários usando SIG e seções geológico-geotécnicas de campo com aplicação na rodovia SP-310*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 138p.
- Moraes, M.A.S. (1985). *Reconhecimento de fácies sedimentares em rochas metamórficas da região de Ouro Preto, Minas Gerais*. In: SBG, Simp. Geol. Minas Gerais, 3. Belo Horizonte, Anais, pp. 84-93. (Boletim 5).
- Reis, R.C. (2010). *Estudo de estabilidade de taludes da mina de Tapira – MG*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – NUGEO Universidade Federal de Ouro Preto, 95p.
- Renger, F.E.; Suckau, V.E.; Silva, R.M.P. (1993). *Sedimentologia e análise de bacia da Formação Moeda, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil*. In: Simpósio de Geologia de Minas Gerais, 7. Belo Horizonte: 1993. Anais. Belo Horizonte, SBG:1993, pp.41-45.
- Silva, A.B. (1999). *Sistemas de Informações Geo-referenciadas*. Editora da Unicamp. Campinas. 250p.
- Vaz, L.F. (1996). *Classificação Genética dos Solos e dos Horizontes de Alteração de Rocha em Regiões Tropicais*. Solos e Rochas, São Paulo. 19 (2), pp. 117-136.