

5. Instabilidade por Tombamento na Mina Tintaya

5.1 Generalidades

Conforme o Capítulo 1, a Mina Tintaya situa-se na região sudeste do Peru, distando de aproximadamente 300 Km da cidade de Arequipa e 300 Km da cidade de Cusco (Figura 1.1). A profundidade do minério é, em média, de 250 a 300m. As características de projeto do talude global e das bancadas estão em função das propriedades geotécnicas do maciço rochoso, cujos taludes globais têm ângulos de mergulho entre 44° e 46°, e taludes de bancada com 15m de altura e mergulhos de 37° e 63° (37° para bancadas de solo e rejeito e 63° para bancadas de rocha). Adicionalmente, considera-se as rampas de acesso construídas com 10% de gradiente e 30m de largura, comunicando a zona de extração do minério com a planta de beneficio e as áreas de descarga de rejeito.

Na mina Tintaya ocorreram diversos tipos de instabilidades geradas pelas condições geológicas do maciço rochoso. Estas instabilidades devem-se ao fato da disposição espacial das descontinuidades em relação à geometria da escavação da mina. O Departamento de Geotecnia fez a zonificação geotécnica da mina com base nas propriedades e características do maciço rochoso. A Figura 5.1 apresenta com números arábicos o zoneamento geomecânico da mina, onde foram definidos os modos possíveis da ruptura. Assim, a zona de estudo está ao redor da zona 2 e em uma parte mínima da zona 3.

Então, neste capítulo serão apresentados os resultados de uma modelagem computacional do tombamento bloco - flexural verificado nas rochas ígneas aflorantes no talude noroeste da Mina Tinatya. O fenômeno começou essencialmente durante o mês de abril de 2004. Em seguida, uma escavação foi empreendida no mês de abril do 2005. A escavação recuou a face, principalmente,

em rochas ígneas (Monzonito e PM3), conformando uma rampa de acesso na parte inferior de aproximadamente 40 m de largura (na cota 4015 até 3955).

Foi utilizado na modelagem o software de elementos finitos feito na PUC-Rio, que modela o maciço rochoso como um meio contínuo-equivalente, conforme foi descrito no Capítulo 4, que inclui os efeitos de orientação e espaçamento das juntas. Este modelo é chamado modelo de Cosserat. O contínuo de Cosserat, conhecido também como contínuo micropolar, acrescenta os graus de liberdade de rotação das interfaces entre as lâminas rochosas ao contínuo convencional. Isto permite a consideração de momentos agindo em um ponto do material, além do campo de tensões convencionais.

As propriedades geomecânicas adotadas na zona de estudo são discutidas nos itens 5.4 e 5.6. Elas foram estabelecidas com base em informações previamente disponíveis na literatura, nas deformações registradas até dezembro / 2005, em relatórios internos da BHP Billiton Tintaya, bem como em ensaios feitos em laboratório. Assim também se procedeu com relação à estimação de propriedades geomecânicas supramencionadas, com base nas propriedades geomecânicas descritas no Capítulo 2.

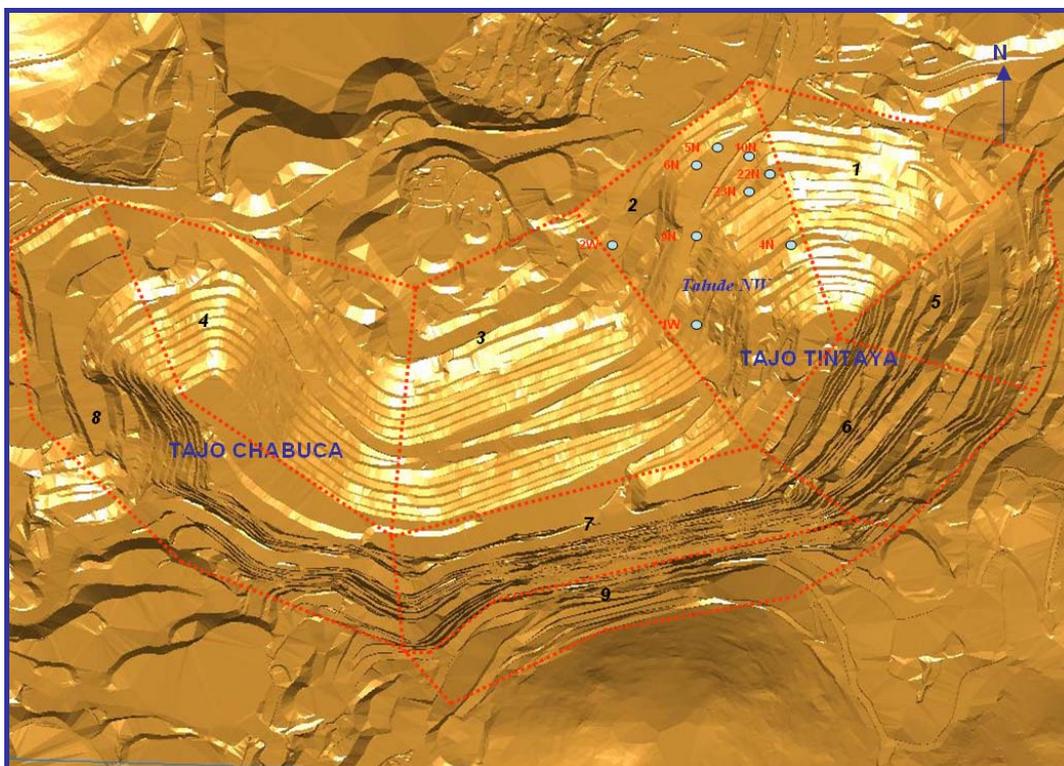


Figura 5.1 Zonificação Geomecânica da Mina Tintaya (Departamento Geotecnia, 2005)

5.2 Geologia da Mina Tintaya

A Geologia da mina caracteriza-se por apresentar rochas cretáceas no substrato divididas tradicionalmente em formação Hualhuani, formação Murco e formação Arcurquina (Figura 5.2 e Figura 5.3). Segundo Maldonado (2006), as rochas cretáceas foram deformadas regionalmente durante as deformações andinas, formando dobras e falhas. As intrusões do Eoceno - Oligoceno atribuídas ao batólito de Abancay cortam as rochas cretáceas em diferentes pulsos magmáticos conformando os depósitos de escarnito do distrito de Tintaya.

Segundo os estudos de Sweng 1997; Brooks, 1999; Loring, 2000; Myers, 2001, as rochas intrusivas estão constituídas por hornblenda, diorito, quartzo monzodiorito, latito e diorito porfirítico. Estas rochas foram estudadas e classificadas com base na descrição petrográfica e na sua composição mineralógica. A classificação atualmente utilizada baseia-se nestes estudos e nos estudos do departamento de Geologia de Tintaya, conforme a Tabela 5.1.

Tabela 5.1; resumo dos tipos de rochas ígneas na mina Tintaya.

Hornblenda diorito	Conforma soleiras e alguns diques ou apófises. Estão compostas de diorito com textura fanerítica fina, rica em hornblenda, enquanto que os diques apresentam uma textura de fluxo, com fenocristais alinhados de plagioclásios.
Quartzo Monzodiorito (PM1)	Têm textura porfirítica média e se caracteriza por apresentar quartzo (>7%), cristais de biotita entre 3 – 6 mm de tamanho (5%), hornblenda tabular (5%), titanita como mineral acessório e ~10 – 15% de matriz. O stock quartzo monzodiorito é cortado por diques de orientação NW, NE e EW, que são posteriores à formação do escarnito. Eles são denotados localmente por Pm2, Pm3, latito e diorito porfirítico, com base nas pequenas variações de textura e composição mineralógica, sendo as suas principais diferenças a porcentagem de fenocristais de quartzo e a razão de hornblenda com biotita.
PM2	Têm poucos fenocristais de quartzo (<5%), uma quantidade significativa de hornblenda (10%), pequenos cristais de biotita (>4%) e tem de 15 - 25% de matriz.
PM3	É fracamente porfirítica com textura seriada, com quartzo (2%), fenocristais de hornblenda (5%) e biotita (1 - 3%) e contém veios sem conteúdo de cobre.
Latito	Têm textura bimodal com conteúdo de plagioclásio (80%), pouco quartzo (1%), hornblenda (6%), biotita (4%) e matriz de composição cálcioalcalina.
Diorito porfirítico	Têm textura porfirítica com plagioclásio (40%), hornblenda tabular (8%), biotita (1%) e matriz afanítica. Caracteriza-se pela ampla faixa de tamanhos dos fenocristais de plagioclásios (0.05 – 1 cm). O dique de diorito porfirítico corta todas as demais rochas ígneas e assim como os escarnitos.

Ma	ERA	PERÍODO	UNIDADES	ESPESS. (m)	COLONA	DESCRIÇÃO DE LITOTIPOS		
1.6	QUATERNÁRIO	Holoc	Depósitos recentes	30-60		Conglomerados, clastos, grânulos, areias e argilas		
		Pleistoceno	Fm. Yauri	230		Sedimentos lacustres não consolidados compostos por conglomerados, areias, argilas, lamias, tufos e localmente por diatomáceas de água doce.		
	NEOGENO	Plioceno	Grupo Barroso	310		Conglomerados com siltes e argilas vermelhas com alguns tufos.		
		Mioceno	Grupo Palca	100		Tufos, arenitos arcossianos e piroclastos branco-amarelo		
	PALEOGENO	Oligoceno	Grupo Tacaza	700		Fluxos vulcânicos de andesitos e dacitos, tufos de composição riolítica e alguns sedimentos tufáceos lacustres. Aflora no cuadrangulo de Condorama. Datadas com K-Ar Noble 1974.		
		Eoceno	Grupo Puno	500-1600		Arenitos arcossianos feldespaticos, conglomerados, clastos de origem fluvial.		
	65	MESOZOICO	CRETACEO	Superior	Fm. Arcurquina (Fm. Ferrobamba)	300-800		<ul style="list-style-type: none"> • Camadas de calcários maciço e abundante, nódulos de silixtito • Margas brechada e calcários maciço com nódulos de silixtito • Camadas macias de calcários micríticos • Discordância angular de baixo ângulo com a Formação Mara
				Medio	Fm. Murco (Fm. Mara)	480		Pelitos marrons intercalados com lamito e quartzo arenito.
			Inferior	Fm. Hualhuani (Fm. Soraya)	800-1000		Bancos de quartzo, arenitos amarelos de granulação fina arredondados. Intercalações locais de pelitos pretos e arenitos cinzas.	
		JURASSICO	Fm. Veille (Fm. Cachios)	600		Arenitos cinzas, intercalados com lutitos pretos. É correlacionado com a Formação Cachios (Jurássico Superior). Aflora nos quadrângulos de Coylloma e Condorama.		
TRIASSICO		Grupo Mitu	710		Seqüência vulcano - sedimentar, composta de lavas andesíticas e camadas grossas de arenitos arcossianos de grão fino a medio. A unidade apresenta uma cor vermelha. Tem discordância erosional com o Grupo Copacabana. Datadas com K-Ar, Kontak, 1985.			
260	PALEOZOICO	PERMIANO	Inferior	Grupo Copacabana	425		Calcários micríticos fossilíferos em camadas grossas. Datados por paleontologia, Newell 1953	

Figura 5.2 Litotipos predominantes na Mina Tintaya (Departamento Geologia, 2005)

5.3 Instabilidade na zona NW de Tintaya

Na zona de estudo, mesmo com um comportamento instável, a produção de minério não deve ser prejudicada. Assim, as conseqüências de uma ruptura (colapso) devem ser mínimas. Para isto, com o auxílio da instrumentação geotécnica, fez-se um programa de monitoramento com a finalidade de se implementarem planos de contingência na lavra. Estes instrumentos (prismas e extensômetros de cabo) foram distribuídos conforme o desenvolvimento das trincas de tração em diferentes níveis do talude (Figuras 1.2 e 5.4). As medições dos pontos de monitoramento de prismas são feitas de um ponto base usando um

instrumento chamado estação total, o qual mede distâncias e ângulos. Por outro lado, os extensômetros de cabo medem os deslocamentos relativos superficiais, consistindo de um cabo tensionado localizado perpendicularmente às trincas de tração.

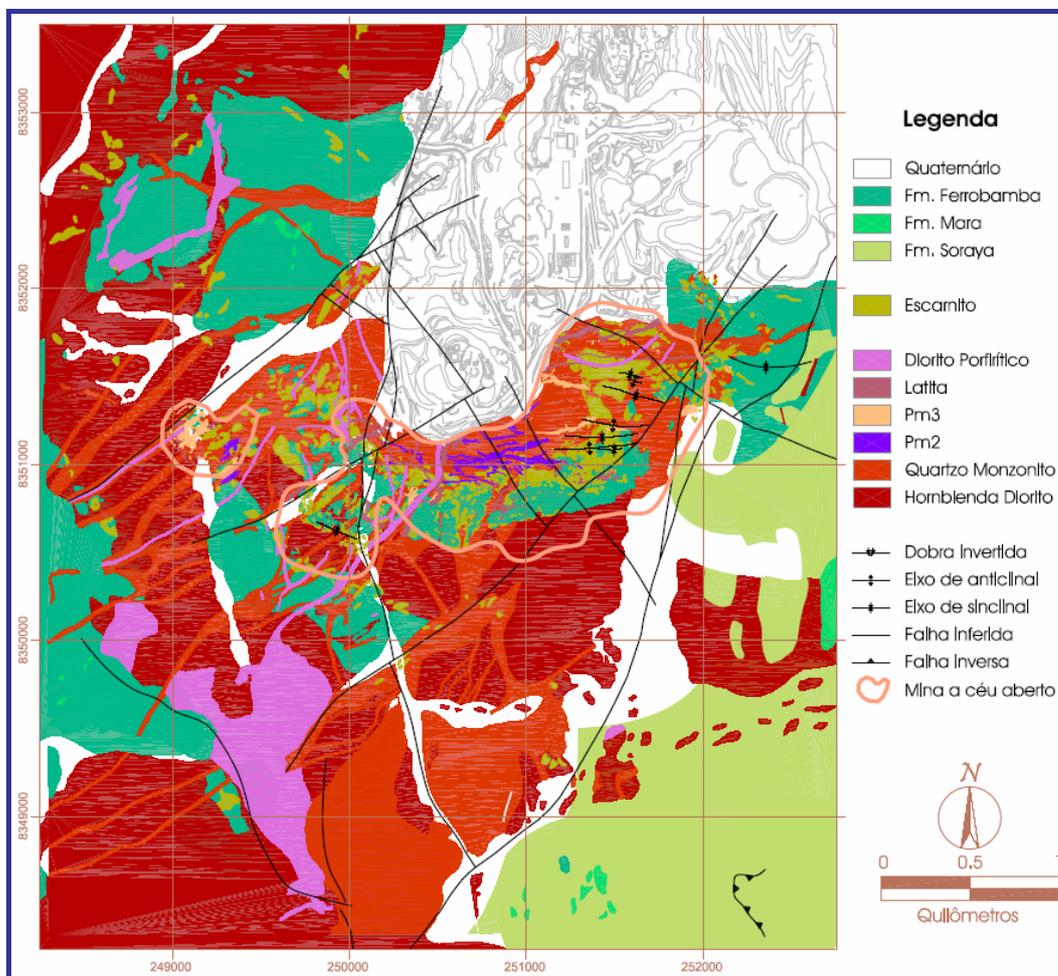
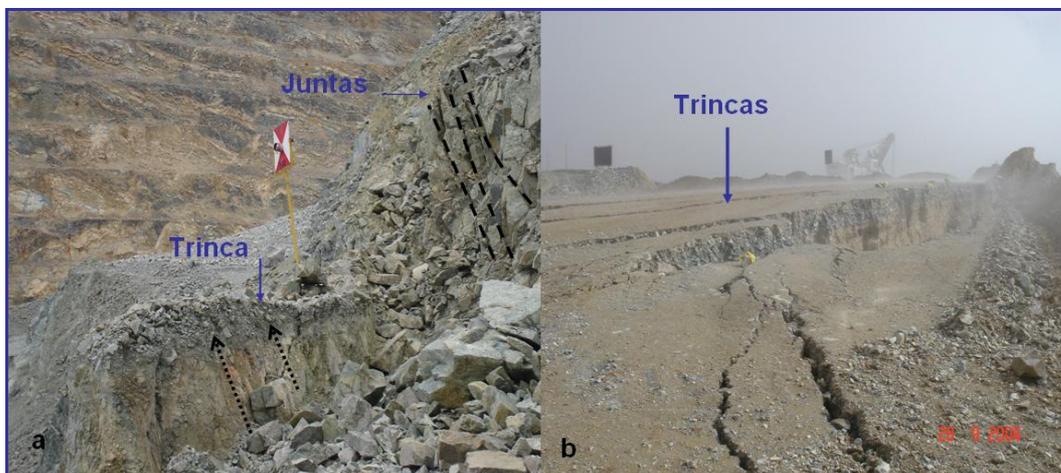


Figura 5.3: Mapa geológico da mina Tintaya (Departamento de Geologia, 2006)

Assim, os registros obtidos dos pontos de monitoramento foram desenvolvidos e analisados até dezembro /2005 (Fig. 5.5). É importante salientar que a data em que foram analisados só se refere aos registros das prismas, já que os extensômetros de cabo consistem em instrumentos complementares para medir os deslocamentos superficiais. Então, os valores que foram obtidos na Figura 5.5 mostram valores de deslocamentos verticais de até 4.5 m, com um valor médio em torno de 2.5 m.

É importante observar que, no início do movimento, os deslocamentos obtidos são bastante consideráveis. Tempos depois mostram uma tendência a uma estabilização. Tal comportamento é indicativo de uma ruptura não catastrófica, na

qual o movimento se desacelera logo após sua iniciação. Segundo Nichol *et al.*, (2002), a trajetória deste tipo de curva é típico do fenômeno de tombamento flexural.



(a) (b)
 Figura 5.4: Desenvolvimento de trincas na zona NW do talude mina Tintaya; (a) trinca desenvolvida na cota 3925, pode-se observar a direção do movimento das juntas desenvolvidas, (b) sistema de trincas desenvolvidas em material de rejeito e solo natural, na cota 4105.

Porém, a magnitude das deformações obtidas suscitou, todavia, algumas dúvidas com respeito à estabilidade global do talude na situação de cava final e à segurança das operações de lavra no local. Com a ocorrência do tombamento e a conseqüente redução da resistência, os modelos elaborados buscaram responder ao comportamento do maciço rochoso e, com isso, fornecer subsídios ao planejamento da lavra a ser realizada no local.

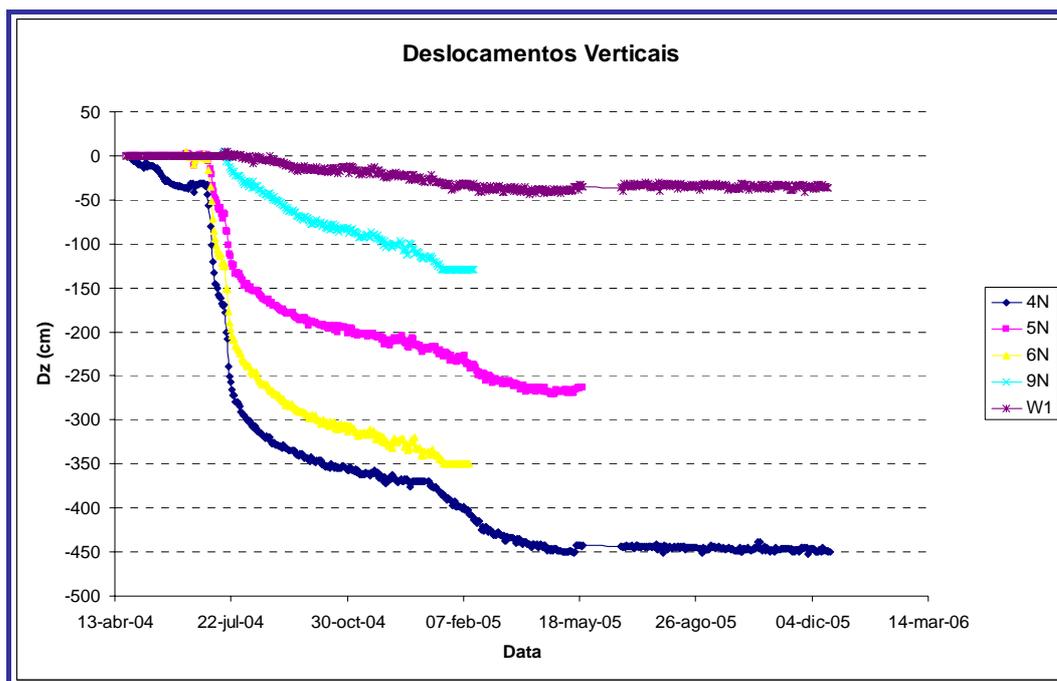


Figura 5.5 Deslocamentos obtidos pelo programa de monitoramento, valor máximo dos deslocamentos verticais 4.5m e valor médio dos deslocamentos verticais relativos: 2.5m

5.4 Estrutura do Maciço Rochoso

O maciço rochoso na área da mina Tintaya é tipicamente heterogêneo e anisotrópico por causa dos diferentes tipos de eventos geológicos relacionados aos eventos da formação da jazida. É importante a caracterização geomecânica das discontinuidades, já que se podem descrever quantitativamente as características mecânicas das discontinuidades e determinar os modos possíveis de ruptura. Então, foram feitos diversos programas de mapeamento geotécnico realizado tanto pelo pessoal do departamento da Geotecnia quanto por alguns consultores externos (Call & Nicholas, 1998 e Ingerock, 2001). O mapeamento geotécnico consistiu em usar janelas de amostragem na face dos taludes com dimensões de 15x20m. Consequentemente, analisou-se desde 1996 até dezembro 2005.

Em concordância ao item 3.6.2 do Capítulo 3, foram feitas a análise cinemática da zona. A Figura 5.6 mostra o resultados destas análises, indicando que existem problemas de tombamento ocasionados por famílias de juntas sub-verticais de orientação NE. Esta zona corresponde ao extremo NW da mina Tintaya (zona 2) que, litologicamente, é dominado por monzonito com ocorrência de corpos de escarnito e alguns diques menores de latito, andesito e PM3. Estruturalmente, ocorrem falhas de orientação NE, NS e NW.

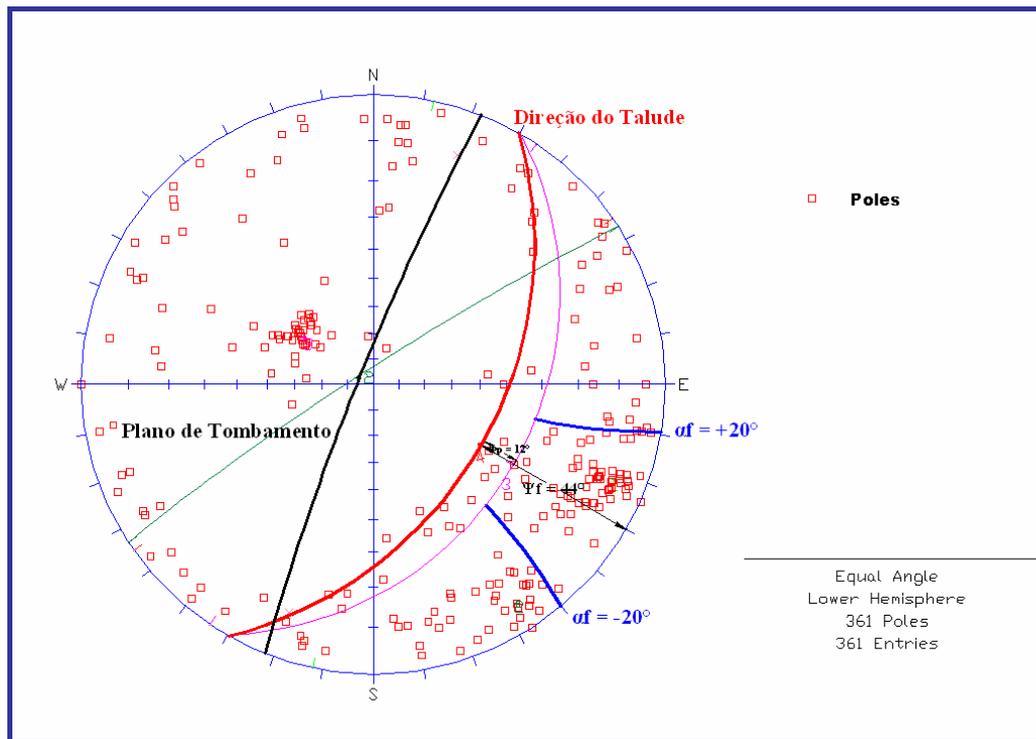


Figura 5.6 Análise cinemática da zona 2, referentes às descontinuidades presentes no maciço rochoso.

O resultado do análise da Figura 5.5 mostra que a direção das estruturas principais é paralela à face do talude NW (pendor ψ_f), logo o escorregamento entre as descontinuidades por tombamento ocorrerá em planos de descontinuidades com pendor ψ_p (normal com pendor $\psi_{np} = 90^\circ - \psi_p$) quando for verificada a condição: $(90^\circ - \psi_f) + \phi < \psi_p$, ou seja, $\psi_{np} < \psi_f - \phi$. Considerando-se $\psi_p = 85^\circ$, $\psi_f = 46^\circ$, $\phi_p = 12^\circ$, e portanto $56^\circ < 85^\circ$, mostra que o potencial de ruptura por tombamento acontece nesta zona. Assim, tal como se mostra na Figura 5.5, o talude é potencialmente instável devido ao fato que, na área de projeção, o ponto que representa a reta de interseção dos dois planos cai dentro da zona crítica delimitada pela circunferência definida pelo ângulo de atrito ϕ (círculo de atrito), e esta é exterior ao “círculo maior” que representa a face do talude.

Além disso, foi feita uma análise que corresponde a uma parte da zona 3 (Figura 5.7), onde litologicamente domina o monzonito e ocorrem alguns diques sub-verticais de PM2. O domínio é delimitado no extremo oeste por um dique de andesito de orientação ~NS e no extremo nordeste pelo dique de PM2. Ocorrem blocos instáveis formando tombamento no extremo nordeste limite com o domínio

2 e formação de algumas cunhas em nível da bancada e ruptura plana nas bancadas da parte média do domínio. Assim, tal como se mostra na Figura 5.6, o talude é potencialmente instável por ruptura por tombamento.

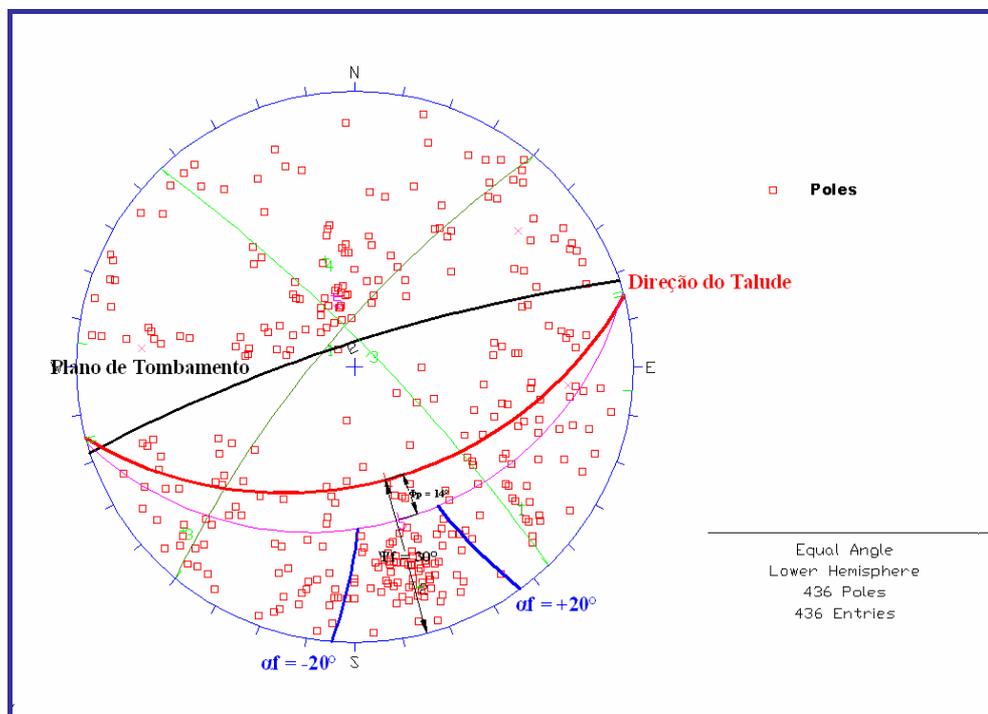


Figura 5.7 Análise cinemática da zona 2, referentes às descontinuidades da zona.

5.5 Análise de Equilíbrio Limite

Como foi descrito no item 3.6.3 do Capítulo 3, e pelos fatos mostrados no item 5.4, foi definido o tipo de ruptura que acontece na zona NW da mina Tintaya. Pelo que se pode afirmar que o tipo de ruptura é o tombamento bloco-flexural, principalmente devido às características que apresentam as descontinuidades no maciço rochoso, já que segundo Hoek & Bray (1977), este tipo de tombamento é um tipo de ruptura um pouco mais complexo do que os outros tipos de tombamento porque é uma combinação de tombamento e deslizamento dos blocos. A Figura 5.8 mostra as características deste tipo de tombamento, onde podem-se observar os deslocamentos acumulados das juntas transversais. Além disso, os deslocamentos sobre cada uma das juntas são de menor grandeza do que no caso de tombamento de blocos.

A Figura 5.7 corresponde à parte superior do talude (nível 4.030 para cima). O espaçamento das descontinuidades sub-verticais estão entre 0.2 e 0.5m e as juntas transversais estão entre 0.2 e 0.4m, pelo que resulta, assim, um meio termo

entre os campos de deslocamentos, contínuo, do tombamento flexural, e descontínuo, do tombamento de blocos. Os fatores que afetam este tipo de mecanismo de ruptura são a interação entre as descontinuidades semi-horizontais e colunares e a altura do talude no mecanismo de ruptura.

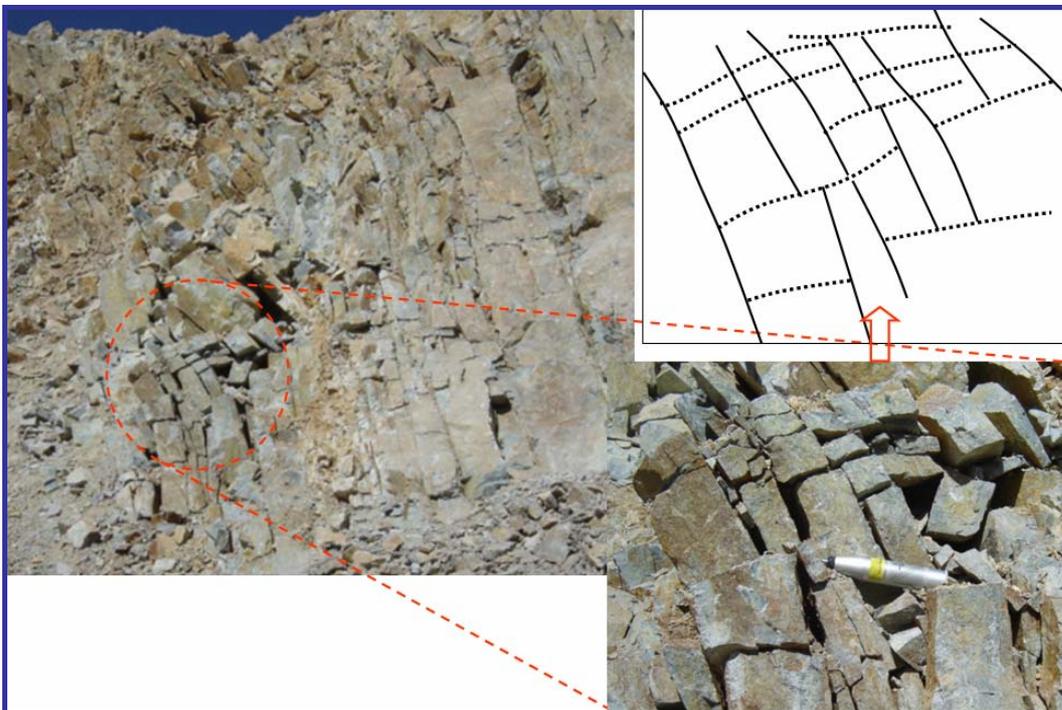


Figura 5.8: Tombamento bloco-flexural definido na zona 2 nível 4030, pode-se observar os deslocamentos acumulados das juntas transversais.

A Figura 5.9 corresponde ao nível 3.955. Esta figura foi tirada em sentido oposto (vista NW – SE) às Figuras 5.7 e 5.9. Pode-se observar que o tipo de tombamento é mais rígido, ou seja, não apresenta deformação devido a fato que o tipo de rocha é PM3, já que o UCS deste tipo de rocha está entre 100 e 130 MPa. Além disso, pode-se observar a danificação por desmonte feita na face das bancadas.

Na Figura 5.10 correspondente ao nível 3.910, que é a parte inferior do talude pelas características que apresenta, é provável que a ruptura originou-se neste local, avançando progressivamente pelo interior do talude até interceptar a sua crista. Segundo Muller (1966), este tipo de instabilidade inicia-se com a rotação das colunas, cisalhamento ao longo das descontinuidades pré-existentes e, conseqüentemente, a ruptura da rocha intacta (ponte rochosa) poderia criar um mecanismo progressivo de ruptura, este condicionado também pela dilatação no

trecho da junta pré-existente. Aquele mecanismo mencionado pelo autor referido é aceitável.

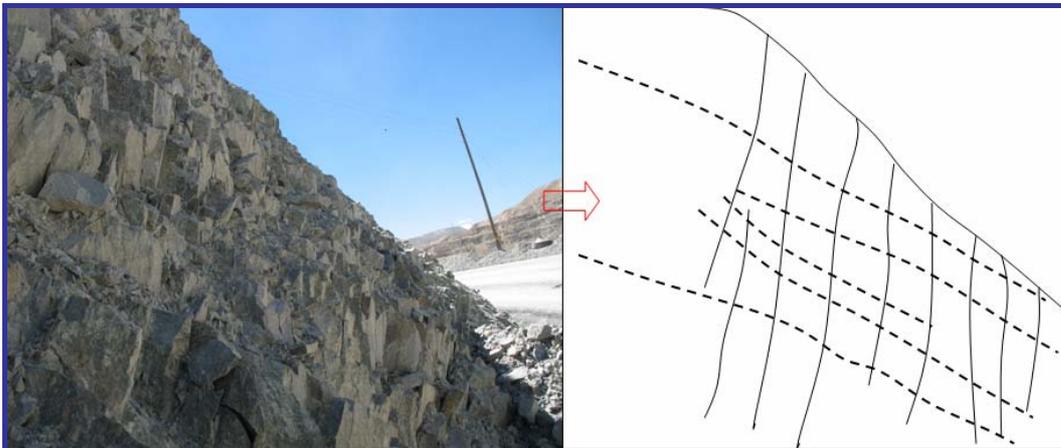


Figura 5.9: Tombamento bloco-flexural no nível 3955, pode-se observar os deslocamentos das juntas transversais.

Por outro lado, de qualquer forma, a ruptura começa num ponto qualquer que não seja necessariamente o pé do talude, devido ao fato que, normalmente em mineração de céu aberto, sobretudo em Tintaya, o avanço da escavação é dinâmico. Logo, o pé do talude geral toma uma nova localização, o que leva a pensar que rupturas sucessivas comecem em seu pé. Portanto, em concordância com as figuras apresentadas, o tipo de ruptura bloco-flexural acontece na parte NW da mina Tintaya.

Finalmente, o caso de análise de equilíbrio limite foi feito pelo método de Aydan & Kawamoto (1987), que considera as fatias das lâminas rochosas como placas engastadas a uma certa profundidade e submetidas à força de gravidade e forças laterais. Logo, a ruptura irá ocorrer em sobre um plano inclinado definido pelos engastes das várias lâminas (plano basal), para cima, normal ao mergulho das descontinuidades.

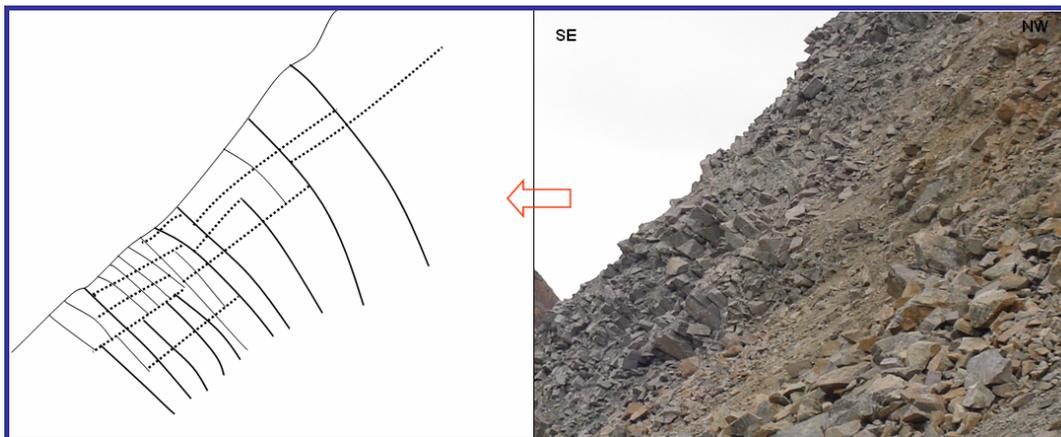


Figura 5.10: Tombamento bloco-flexural no nível 3910.

Todas as lâminas a partir do topo do talude, as quais haja instabilidade ao tombamento ($P_{i-1} > 0$), foram analisadas com a metodologia de A&K, aplicando-se sucessivamente as equações do Capítulo 3 (item 3.6.3), um critério válido para a condição global do mesmo, a saber:

- se $P_0 < 0$, estável;
- se $P_0 = 0$, equilíbrio-limite;
- se $P_0 > 0$, instável.

Então, obtém-se, finalmente, os resultados mostrados nas Tabelas 5.2 e 5.3 (Anexo 2) onde se pode observar o risco de ruptura ao nível da bancada e ao nível do talude global. Adicionalmente, permite determinar a extensão do banco/talude em que o tombamento das colunas acontece. Com a análise das bancadas, nota-se que uma grande parte do talude tem colunas tombadas (que são aquelas para as quais o valor de P na última coluna é positivo). As exceções são as primeiras colunas do topo (antes da crista) e as últimas da base (próximas ao pé), cujas alturas são muito pequenas para que haja tombamento. Entretanto, este fato não tem relevância prática (é na realidade uma deficiência do método, que deveria contemplar também outros mecanismos - como cisalhamento, por exemplo - para essas colunas mais baixas). Assim, os resultados do método de A&K estão confirmando o que se pode notar nas Figuras 5.7, 5.8 e 5.9. Adicionalmente, determinou-se um fator de segurança segundo o critério de Goodman & Bray (1976), aplicando-se a Equação 3.1, como mostrado a seguir:

$$FS_{\text{talude}} = \text{tg}(36^\circ) / \tan(46^\circ - (90^\circ - 84^\circ)) = 0.87 \text{ e}$$

$$FS_{\text{bancadas}} = \text{tg}(36^\circ) / \tan(60^\circ - (90^\circ - 84^\circ)) = 0.53.$$

Portanto, tanto o talude quanto as bancadas seriam susceptíveis ao tombamento flexural com as geometrias atuais. As bancadas mostrariam um processo mais acentuado devido ao seu FS bem menor, mas o talude global também deveria mostrar evidências do fenômeno.

O que sucede com o critério de Goodman & Bray, no entanto, é que o mesmo diz respeito, de fato, ao deslizamento relativo entre as colunas, o que vem a ser um pré-requisito para o tombamento flexural. Sendo assim, o mesmo só indica uma susceptibilidade à iniciação do processo, porém não haverá ruptura do banco ou talude como um todo.

5.6 Propriedades do Maciço Rochoso

As propriedades mecânicas utilizadas na modelagem foram, primeiramente, selecionadas de relatórios internos da área de Geotecnia da mina, literatura técnica (Barton & Choubey, 1977; Bandis et al., 1983; Hoek & Brown, 1997; Hoek *et al.*, 2002), conforme foi discutido no Capítulo 2. Para determinar as propriedades de resistência e propriedades elásticas do maciço rochoso foi empregado o *software* RocLab, da RocScience.

Cabe salientar que se trata de um grande número de parâmetros de resistência e deformabilidade dos vários materiais e interfaces rochosas. Para todos os materiais e interfaces foram considerados modelos constitutivos elastoplásticos de Mohr-Coulomb (Goodman, 1989), não associados e não ideais (com amolecimento instantâneo na plastificação), segundo Pande *et al.* (1990).

Cabe ressaltar que as propriedades geomecânicas descritas no Capítulo 2 e/ou relatórios internos se limitam aos parâmetros de resistência de pico. Com relação a parâmetros residuais para maciços rochosos, só se dispõe das sugestões qualitativas fornecidas por Hoek & Brown (1997). A Figura 5.11 mostra basicamente que: para maciços com valores de GSI (*Geological Strength Index*) ≥ 75 , o comportamento seja do tipo elasto-frágil perfeito; para $75 < \text{GSI} \leq 30$ o comportantento deve ser elasto-plástico com amolecimento; e para $\text{GSI} < 30$, seja elasto-plástico perfeito.

A resistência à tração (σ_t) foi estimada em 1/10 da resistência à compressão uniaxial (σ_c), Goodman (1989). Para o critério de resistência de Mohr-Coulomb

$$\text{tem-se, então (Goodman, op. cit.): } \sigma_t = 0.1 \frac{2c_p \cos \phi_p}{1 - \sin \phi_p}.$$

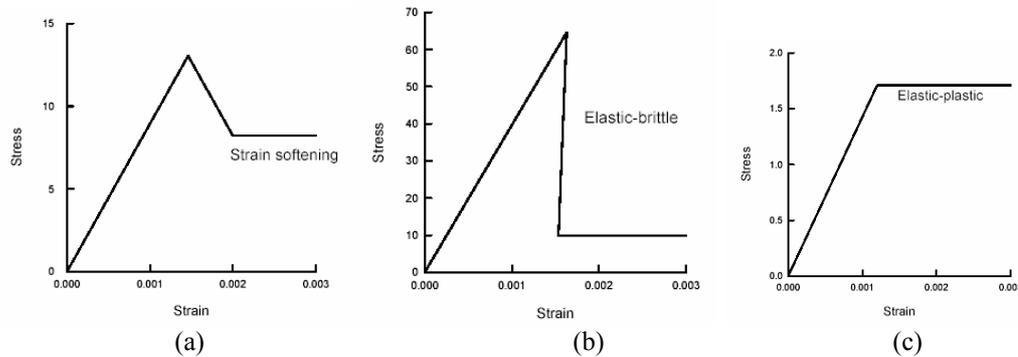


Figura 5.11 – Comportamento pós-pico típico em função do GSI do maciço rochoso (Hoek & Brown, 1997): (a) $GSI \geq 75$, elasto-frágil perfeito; (b) $75 < GSI \leq 30$, elasto-plástico com amolecimento e (c) $GSI < 30$, elasto-plástico perfeito.

É importante salientar que o modelo elasto-plástico de Mohr-Coulomb é sempre do tipo perfeito, seja ele elasto-frágil ou elasto-plástico. Em relação aos parâmetros elásticos, foram estimados conforme ao Capítulo 2 (item 2.5) e de indicações advindas da literatura e de relatórios internos. Neste caso, tem-se os parâmetros elásticos E (módulo elástico ou de Young) e ν (coeficiente de Poisson) e o parâmetro de fluxo plástico ψ (ângulo de dilatância). Os resultados destas estimativas são mostrados na Tabela 5.2. Cabe salientar que elas foram feitas em função da zonificação da zona estudo em três zonas (M1, M2 e M3), que correspondem à zona 2. Os parâmetros de entrada foram promediados em concordância com a zonificação geotécnica feitos pelo departamento de Geotecnia.

No caso das interfaces das discontinuidades, utiliza um modelo elasto-plástico perfeito de Mohr-Coulomb (Pande et al., 1990). As propriedades de resistência requeridas são coesão de pico, c_j (residual coincidente), ângulo de atrito de pico, ϕ_j (residual também coincidente), e as resistências à tração (σ_{ij}), c_j e ϕ_j para as lâminas delineadas pelo tombamento. Estes dados foram tomados dos relatórios internos da mina Tintaya. Com referência aos parâmetros de deformabilidade das juntas / interfaces, eles são: rigidez normal da junta (Kn) e rigidez cisalhante da junta (Ks).

Tabela 5.2: Resumo das estimações dos parâmetros geoemecânicos do maciço rochoso.

Parâmetros	MI	MII	MIII
σ_{ci} (MPa)	100	130	90
GSI	40	50	42
m_i	29	29	29
D	0.7	0.7	0.7
mb	1.07314	1.85901	1.1978
s	0.000167	0.000713	0.000224
a	0.511368	0.505734	0.509923
σ_{3max} (MPa)	4.21277	4.43384	4.19669
γ (MN/m ³)	0.027	0.027	0.027
Slope Height (m)	200	200	200
c (Mpa)	1.206	1.68188	1.21655
σ_t (MPa)	-0.01559	-0.04984	-0.0168
σ_c (MPa)	1.17174	3.32942	1.238
σ_{cm} (MPa)	13.168	23.2449	12.6201
Em (MPa)	3655.22	6500	3890.76

Estes parâmetros foram obtidos em função das equações do Capítulo 2 (item 2.3 e 2.4), que relacionam linearmente as tensões e os deslocamentos nas direções normal e tangencial, respectivamente (Barton & Choubey, 1977; Bandis et al., 1983; Goodman, 1989). As propriedades e características das descontinuidades foram obtidas a partir do mapeamento geotécnico feito pelo departamento de Geotecnia. A Tabela 5.3 mostra o resumo dos setores 2 e 3 (zonificação geotécnica) com as características das famílias principais. A estimativa da rigidez normal (K_n) e rigidez cisalhante (K_s), para cada família de juntas, fundamenta-se na equação empírica de Bandis *et al.* (1983), como é mostrado na Tabela 5.4. Este dado é calculado para um talude de 100m de altura, que corresponde à zona MII.

Tabela 5.3: Resumo das características das descontinuidades das zonas 2 e 3

Setor	Rocha	Fam	Dip	Dip dir	Persist. (m)	Espac. (m)	Rugosidade		Schmidt	ϕ_b	Ratio r/R	ϕ_r	γ KN/m ³
							Jr	JRC10					
2	Mz	1	83	289	46	0.23	1.6	9.6	52.7	29	0.6	21	24.9
		2	87	241	16	0.28	1.5	9.7	54.0	29	0.6	21	24.9
		3	84	334	23	0.24	1.5	9.4	55.5	29	0.6	21	24.9
		4	40	114	31	0.13	1.6	10.2	52.4	29	0.8	25	24.9
3	Mz	1	59	113	29	0.18	1.3	8.7	48.0	29	0.7	23	24.9
		2	80	312	60	0.20	1.5	9.5	50.6	29	0.6	21	24.9
		3	45	178	34	0.17	1.6	10.1	52.4	29	0.6	21	24.9
		4	81	12	21	0.25	1.4	9.1	50.0	29	0.6	21	24.9
		5	75	333	44	0.25	1.4	9.5	49.0	29	0.7	23	24.9
		6	81	47	18	0.28	1.4	9.2	54.4	29	0.6	21	24.9
		7	76	160	57	0.13	1.4	8.7	54.7	29	0.8	25	24.9

Tabela 5.4: Resumo das propriedades estimadas das descontinuidades das zonas 2 e 3 (H = 100m).

Setor	Rocha	Familia	JCS _o MPa	JCS _n Mpa	JRC _n (°)	σ_n MPa	Log(JCS _n / σ)	ϕ_p (°)	K _s MPa/m	K _n MPa/m
2	Mz	1	51.7	8.9	3.0	0.303	2.3	28	14.49	1.45
		2	53.8	12.2	3.6	0.130	2.8	31	7.02	0.70
		3	56.4	12.1	3.4	0.260	2.5	30	13.16	1.32
		4	80.7	13.9	3.2	1.907	1.7	30	98.68	9.87
3	Mz	1	55.1	12.5	3.2	1.282	1.8	29	62.88	6.29
		2	48.5	7.9	2.8	0.432	2.1	27	19.92	1.99
		3	51.3	8.8	3.1	1.761	1.5	26	76.05	7.61
		4	47.6	11.1	3.5	0.390	2.3	29	19.18	1.92
		5	57.1	10.1	3.0	0.644	2.0	29	32.10	3.21
		6	54.5	12.8	3.5	0.390	2.3	29	19.45	1.95
		7	88.3	16.9	2.9	0.602	2.3	31	33.11	3.31

5.7

Modelagem Numérica

Finalmente, para estudar os mecanismos de ruptura da zona de estudo, foram estabelecidas algumas considerações a serem feitas no modelo, como foi adiantado no item 5.4 e 5.5. O tombamento bloco-flexural definido é um caso misto, intermediário, entre os tombamentos puros (o de blocos e o flexural), o qual não tem um procedimento de análise específico. A depender da escala do problema (por meio do valor da razão [espessura das colunas]/[altura do talude]) pode ser mais conveniente analisar o tombamento bloco-flexural como sendo de blocos (se a razão acima for grande) ou flexural (se a razão for pequena), ou seja, analisar o maciço, respectivamente, como um descontínuo propriamente dito ou um contínuo "equivalente". No caso da mina Tintaya, definiu-se que a aproximação contínua (e, portanto, a análise de um tombamento flexural "equivalente") é a que melhor se adapta. Isso porque o espaçamento de 0.65 m é pequeno em relação à altura do talude (e mesmo em relação à altura das bancadas podemos considerá-lo pequeno).

Portanto, no caso do talude global optou-se por uma análise de tensões-deformações por elementos finitos utilizando o modelo elastoplástico de Cosserat para meios estratificados. Para estudar os mecanismos que geram a ruptura por tombamento, foram estabelecidas algumas considerações a serem feitas no modelo. O primeiro passo para a simulação numérica foi definir a construção do modelo, basicamente, no que se refere aos aspectos geométricos a serem considerados nas análises.

Para a construção do modelo, considerou-se a seção completa da cava da mina. O modelo de elementos finitos da Mina Tintaya contém três materiais, conforme ilustrado na Fig. 5.12, onde os materiais MI e MIII são modelados como elástico-lineares isotrópicos de Cosserat. Já o material MII, correspondente à zona susceptível ao tombamento flexural, será considerado um meio elastoplástico estratificado de Cosserat. Foi adotada a hipótese de estado plano de deformação nas análises.

Alguns parâmetros, específicos do modelo de Cosserat para meios estratificados, foram estimados:

- resistência à tração das descontinuidades (σ_t^j) = 0;
- módulo de cisalhamento anti-simétrico (G_c) = G .

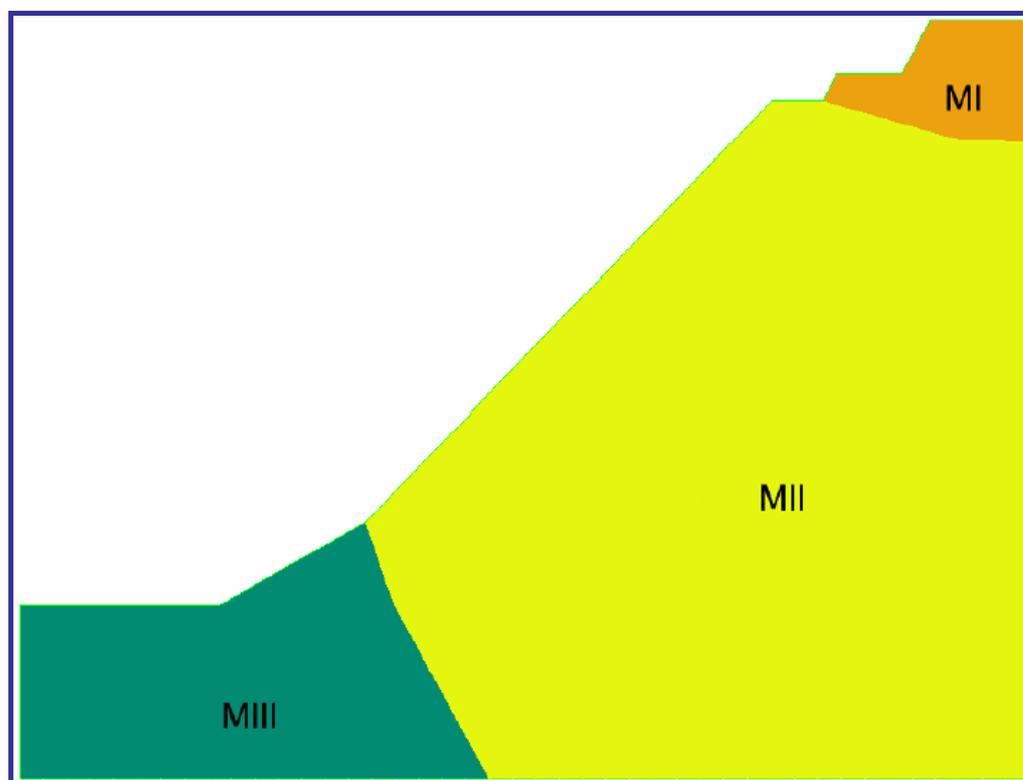


Figura 5.12 – Modelo adotado da Mina Tintaya.

Já a coesão momento (\hat{c}) foi inicialmente calculada a partir da resistência à tração do material das descontinuidades (σ_t) pela expressão usual que fornece as tensões normais máximas em uma viga sujeita a flexão pura, a saber

$$\sigma_t = \frac{Mt}{2I}, \text{ onde } M \text{ é o momento fletor, } I \text{ o momento de inércia e } t \text{ a}$$

espessura das descontinuidades. Pode-se obter facilmente a partir daí que

$\sigma_t = \frac{6m}{t}$, na qual m é a tensão momento ao longo do estrato. Admitindo que $m \approx \hat{c}$ pode-se usar a expressão anterior para se calcular uma estimativa da coesão momento. Para MII, $\sigma_t = 0.2$ MPa. Assim, utilizando-se $t = 0.65$ m, chega-se a $\hat{c} = 0.0022$ MN/m.

As condições de contorno para o problema em estudo são apresentadas na Figura 5.13. A malha utilizada na análise é composta por 1.012 nós e 1.888 elementos finitos triangulares de deformação constante (CST). As condições de contorno utilizadas são:

1. na borda inferior do modelo é impedido o deslocamento na direção y e rotações em z ;
2. na borda direita são impedidos o deslocamento na direção x e a rotação em z ;
3. na borda esquerda são impedidos o deslocamento da direção x e a rotação em z .

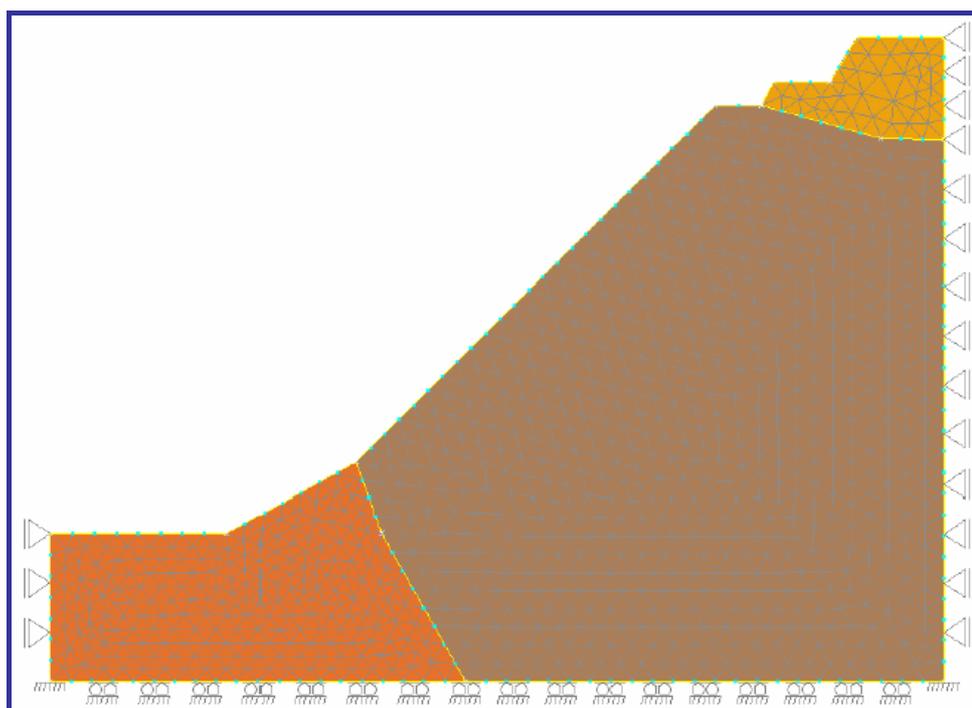


Figura 5.13 – Malha de elementos finitos para o modelo da Mina Tintaya.

No caso de estado de tensões iniciais em escavações a céu aberto, o estado de tensões virgens é perturbado conforme o avanço da escavação. O vazio criado pela modificação da geometria força as tensões a se redistribuírem ao longo da borda da cava.

A literatura mostrou, recentemente, que a análise numérica normalmente utilizada para o estudo do comportamento de taludes ainda não consegue

reproduzir todos os fenômenos envolvidos. O conhecimento do estado de tensões num talude é muito importante, já que conforme a sua magnitude, poderia se gerar algum tipo de manifestação como a deformação do maciço rochoso, a qual pode-se traduzir em dano e instabilidade.

As tensões utilizadas no modelo de elementos finitos foram apenas as devidas às forças de massa (gravitacionais = peso próprio das rochas). Não foi considerada a possível existência adicional de um campo de tensões iniciais *in situ*, que se superporia às forças gravitacionais com um valor de K qualquer (na mina Tintaya provavelmente, seria maior que 1). Provavelmente um campo de tensões iniciais *in situ* com $K > 1$ contribuiria ainda mais para agravar o processo de tombamento.

As propriedades finais, resultantes após ajustes em alguns casos, foram promediados para todas as três zonas envolvidas no modelo (MI, MII e MIII). Elas estão resumidas na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Parâmetros de resistência e deformabilidade do modelo de Tintaya.

Propriedades geomecânicas	MI		MII		MIII	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
γ (MN/m ³)	0.018	0.018	0.025	0.027	0.025	0.028
E (MPa)	26000	35000	25000	30000	26000	35000
ν	0.25		0.25		0.25	
UCS (MPa)	60	80	60	130	60	150
Resistência à tração - σ_t (MPa)	0.15	0.3	0.2	0.3	0.25	0.3
Rigidez cisalhante da junta - K_s (MPa/m)	20.6		39.6		63.9	
Rigidez normal da junta - K_n (MPa/m)	2.1		4		6.4	
Coesão de pico - c_p (MPa)	1		0.6		1	
Coesão residual - c_r (MPa)	0.2		0.4		0.2	
Ângulo de atrito de pico - ϕ_p (°)	25		36		30	42
Ângulo de atrito residual - ϕ_r (°)	31		31		31	
Ângulo de dilatação ϕ (°)	5		5		5	
Espaçamento das desc. ε (m)	0.5	1.2	0.3	1	0.5	1.2

5.7.1

Resultados Obtidos

Os resultados obtidos com o modelo elastoplástico de Cosserat para meios estratificados forneceram o padrão do campo de deslocamentos ilustrado abaixo.

As características do mesmo sugerem um mecanismo de tombamento composto: uma zona de tombamento flexural em MII, associada à existência de um bloco ativo (“Graben Block”) logo acima (provavelmente devido à subsidência de MI). Tal mecanismo tem sido notado em várias minas, como por exemplo: Mina Brenda (Canadá – Pritchard & Savigny, 1990), Mina Cassiar (Canadá – Sjoberg, 1999) etc.

Esses padrões de deslocamentos supramencionados podem ser comprovados na Figura 5.4b, já que as trincas desenvolvidas nesta parte estariam mostrando a formação do bloco ativo (Fig 5.14). Conseqüentemente, a ruptura estaria começando num ponto qualquer que não fosse necessariamente o pé do talude devido ao fato que, normalmente em mineração de céu aberto, como foi adiantado, o avanço da escavação é dinâmico, logo o pé do talude geral toma uma nova localização, o que leva pensar que rupturas sucessivas comecem no pé. Portanto, em concordância com as figuras apresentadas, observa-se que o tipo de ruptura bloco-flexural acontece na parte NW da mina Tintaya.

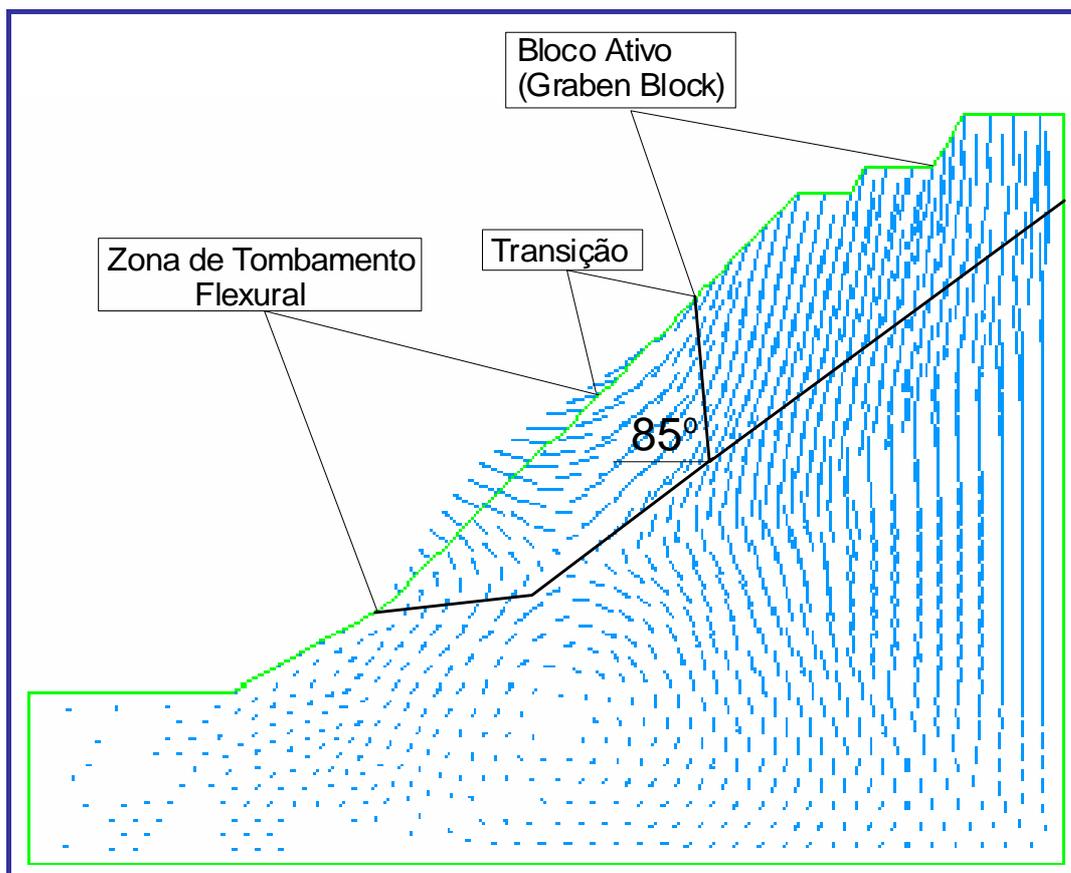


Figura 5.14 – Campo de deslocamentos mostrando o possível mecanismo de ruptura por tombamento do talude.

O padrão dos deslocamentos na zona de tombamento flexural propriamente dita (em MII) é bem típico desse tipo de fenômeno. Algumas características são notáveis, como, por exemplo (Fig. 5.15):

- os deslocamentos horizontalizados de maior magnitude no topo;
- uma convergência dos vetores na base indicando ocorrência de compressão.

Vários autores encontraram padrões com características semelhantes (Sjoberg, 1999; Dilásccio & Figueiredo, 2005 etc.).

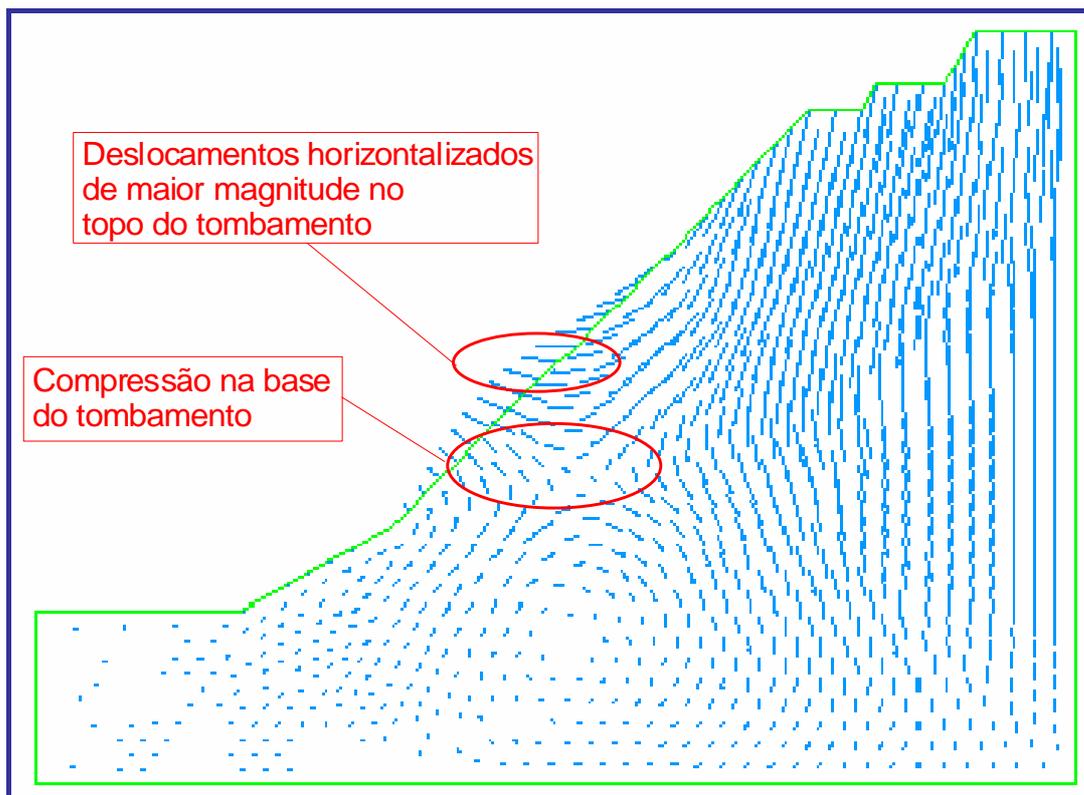


Figura 5.15 – Características típicas do padrão de deslocamentos em análises de tombamento flexural.