

Retroanálise da Ruptura da Cava de Morro Agudo

Glauber Rezende Freire

F&Z Consultoria e Projetos, Belo Horizonte, Brasil, grezendefreire@gmail.com

Isabela Ribeiro Trópia

Vale, Belo Horizonte, Brasil, isabela.tropia@vale.com

RESUMO: No ano de 2004, foi registrada uma ruptura gerando 800.000t de material mobilizado do talude norte da Cava de Morro Agudo. A massa rompida era constituída por material heterogêneo indicando que sua superfície de ruptura abrangeu diversas camadas na sequência da estratigrafia local. O mapeamento geológico realizado identificou uma zona de cisalhamento rúptil-dúctil de direção NW-SE com mergulho subvertical para SW que define a parede direita da ruptura. Estudos de retro análise foram realizados com intuito de compreender o fenômeno utilizando modelo 2D no programa Slide 6 (*Rocscience*). A seção de retro análise obteve fator de segurança pouco abaixo da unidade, confirmando assim a geometria instável que se encontravam os taludes na época. Os *debris* percorreram desde a base da ruptura aproximadamente 500 m de distância com espalhamento médio lateral de 100 m numa topografia em vale fechado. O alcance dos *debris* impressiona pela extensa distância percorrida e se explica provavelmente pela presença de água (alto nível piezométrico) nos litotipos na base da ruptura.

PALAVRAS-CHAVE: Ruptura plano-circular, zona de Cisalhamento, alcance *debris*.

1 INTRODUÇÃO

A cava de Morro Agudo pertence à Mina de Água Limpa localizada no município de Rio Piracicaba, Minas Gerais a cerca de 130km da capital Belo Horizonte, Figura 1.

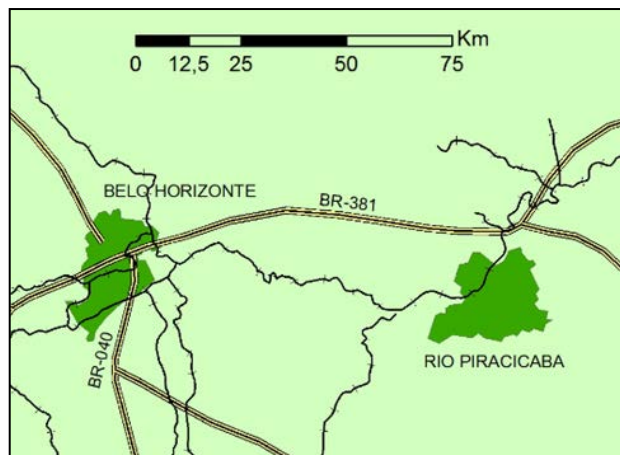


Figura 1. Localização da cidade de Rio Piracicaba/MG município onde se localiza a mina.

Em maio de 2004, foi registrada uma ruptura na porção N da cava de Morro Agudo com

extensão lateral aproximada de 200m na porção superior e em torno de 100m na parte intermediária. Esta mobilizou quase 120m de altura de talude, cerca de 800 mil toneladas de *debris* foram gerados cobrindo todo fundo da cava e percorrendo 500 m de distância, Figura 2.



Figura 2. Imagem da cava de Morro Agudo, ruptura e *debris* no fundo da cava, (Foto tirada em 2014).

O objetivo deste estudo foi interpretar esta ruptura ocorrida, seus mecanismos de

instabilização e fazer uma retroanálise do evento. Para isso foi realizado o mapeamento geológico-geotécnico, descrição de furos de sondagens disponíveis, coleta de blocos indeformados, ensaios geotécnicos de laboratório, interpretação de seções geotécnicas e análises de estabilidade. Estudos anteriores realizados internamente também foram considerados.

A cava de Morro Agudo estava paralizada a 6 anos quando houve a ruptura, e hoje se encontra em expansão. Estão programadas geometrias de lavra para o futuro e faz-se necessário o entendimento do ocorrido para execução dessas novas geometrias com segurança nas operações mineiras.

2 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA

2.1 Aspectos Geológicos

Na cava de Morro Agudo estão presentes algumas das unidades dos Supergrupos Minas e Rio das Velhas e do embasamento cristalino como mostra o mapa da Figura 3. As unidades serão descritas abaixo.

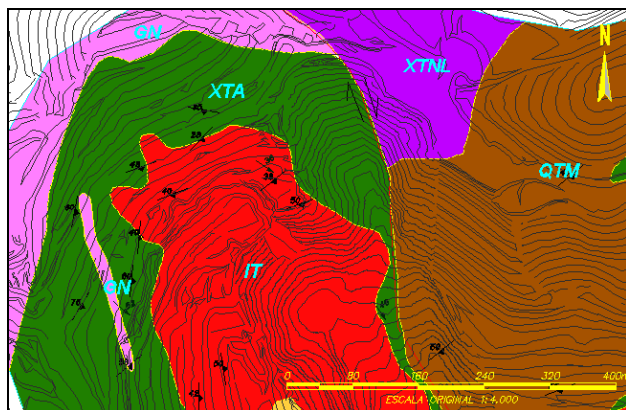


Figura 3. Mapa litoestrutural simplificado sendo GN – Gnaiss, XTA – Xisto da Formação Batatal, IT – Formação Cauê, XTNL – Xisto do Grupo Nova Lima e QTM – Quartzito da Formação Moeda, (VOGBR, 2015).

2.1.1 Embasamento Cristalino

O embasamento cristalino é composto por um gnaiss de textura bandada, apresentando algumas vezes princípio de fusão parcial principalmente próximo do contato superior

com o Grupo Nova Lima.

Em superfície, o gnaiss é encontrado na cava de Morro Agudo como lentes estruturais, nas quais o bandamento está quase sempre transposto pelo cisalhamento.

2.1.2 Grupo Nova Lima Indiviso

O Grupo Nova Lima é representado na área de estudo por um quartzito mica-xisto de coloração alaranjada e textura fina. Ocorre, como mostra o mapa da figura 3, à norte da cava.

2.1.3 Formação Moeda – SG Minas

A Formação Moeda ocorre na região norte da cava e é formada por um quartzito pouco micáceo de granulação fina a média. Apresenta níveis mais micáceos quando adquire uma coloração mais avermelhada.

2.1.4 Formação Batatal – SG Minas

A Formação Batatal, junto com os itabiritos da formação Cauê representa a maior parte das rochas que afloram na cava. Essa unidade é formada por um anfibólio-quartzito mica-xisto de coloração esverdeada quando não alterado. Quando próximo do contato com as formações ferríferas se torna um pouco ferruginoso.

2.1.5 Formação Cauê – SG Minas

Essa unidade é composta basicamente por itabiritos com algumas lentes anfibolíticas e de hematita.

Apresenta coloração acinzentada e branca devido ao bandamento composicional típico desse tipo de rocha e apresenta como mineral ferroso, além da hematita, magnetita.

2.1.6 Formação Cercadinho – SG Minas

Encontrado na região sul da cava e pode ser dividida em duas unidades, umas mais quartzosa e outra mais micácea.

O quartzito micáceo da Formação Cercadinho ocorre em contato direto com a formação ferrífera e se estende em uma faixa com direção E-W.

A transição entre o quartzito micáceo e o xisto quartzoso é suave, o que torna a definição do contato difícil de ser feita. O xisto quartzoso tem uma coloração vermelho arroxeada.

2.2 Caracterização Estrutural

A região da cava de Morro Agudo está inserida na porção leste do cráton São Francisco e nordeste do quadrilátero ferrífero.

Os dados estruturais coletados na cava durante o mapeamento realizado em setembro de 2015 indicam que a cava sofreu processos de cisalhamento simples decorrentes de um movimento de massa com direção de SE para NW. De acordo com o relatório de estudos internos da SBC (2005), as deformações ocorreram por esforços principalmente em estado dúctil, de forma heterôgenea em um processo progressivo, inicialmente dúctil e, a partir disto, cada vez mais rúptil, configurando transporte tectônico das massas rochosas por meio de cavalgamento de baixo ângulo.

Dentre as várias estruturas encontradas como foliação milonítica, lineação de estiramento mineral e outras, a mais importante para o presente estudo é uma falha NW-SE com alto ângulo de mergulho para SW. Essa falha parece ter sido gerada por um movimento relativo diferenciado causado por algum anteparo estrutural.

2.3 Caracterização dos Maciços Geomecânicos

O modelo geomecânico foi gerado por meio da classificação geomecânica dos maciços rochosos, obtido a partir dos dados levantados no mapeamento e reconhecimento de testemunhos de sondagens exploratórias.

Para a classificação geomecânica do maciço utilizaram-se os critérios de Bieniawski (1989) e Barton *et. al.*, (1974).

A cava de Morro Agudo é composta predominantemente por maciços classe V, mas também são encontradas as classes IV e III, Figura 4. Na região da ruptura é encontrada quase que exclusivamente materiais de classe V (xistos), sendo que a porção oeste da cicatriz é limitada por maciços de melhores classes (IV e

III) associados aos quartzitos (Grupo Nova Lima) e itabiritos.

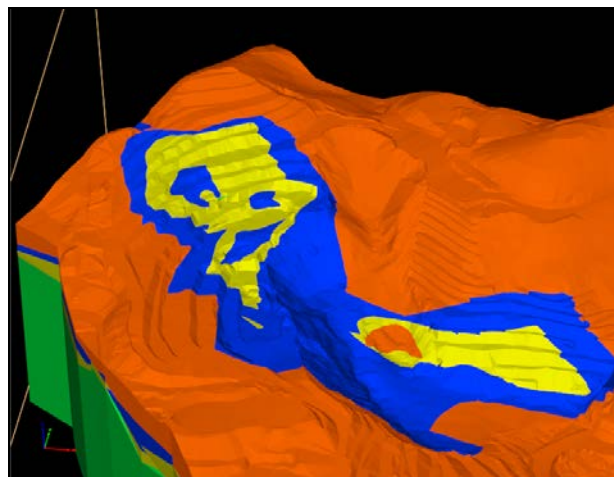


Figura 4. Modelo 3D geomecânico da cava de Morro Agudo. Maciço rochoso classe V, cor laranja; classe IV, cor azul; classe III, cor amarela; classe I-II, cor verde.

Os quartzitos possuem resistência variando de medianamente resistente a resistente e geralmente possuem duas famílias de fraturas. Os itabiritos da porção NW da cava possuem resistência variando entre resistente a muito resistente, com superfícies cisalhadas e lineação de estiramento E-SE com mergulhos médios a baixos, SBC (2005). Os itabiritos da região E da cava apresentam composição quartzosa, com baixos valores de resistência, sendo essencialmente friáveis.

De acordo com o relatório da empresa VOGBR (2015) a classe V na região da ruptura chega a atingir profundidades de até 150 metros, permitindo que a ruptura se desenvolvesse quase toda dentro dessa classe, Figura 4.

3 RUPTURA DA CAVA DE MORRO AGUDO

3.1 Descrição da ruptura

A ruptura registrada na cava de Morro Agudo ocorreu segundo relato das pessoas que trabalhavam no local de maneira abrupta e não houve nenhum grande indício de deflagração do processo de instabilização, SBC (2005). A cava não estava em operação desde o ano de 1998 e em 2002 quando foi realizado um mapeamento geológico não foi identificada nenhuma

evidência de instabilidade.

A análise dos dados mostra uma condição especial para a instabilização ocorrida, com a situação hidrogeológica, a estrutura geológica local e estrutura regional definida pela zona de cisalhamento entre o itabirito e o xisto do Grupo Nova Lima que definiu uma das laterias da geometria da ruptura.

3.2 Nível da Água

O monitoramento piezométrico na região da ruptura é realizado por piezômetros conforme apresenta Figura 5, sendo dois piezômetros nas rochas encaixantes xisto (MOAFG00004) e quartzito (NAMAQT01) e um no minério (MOAFG00002).

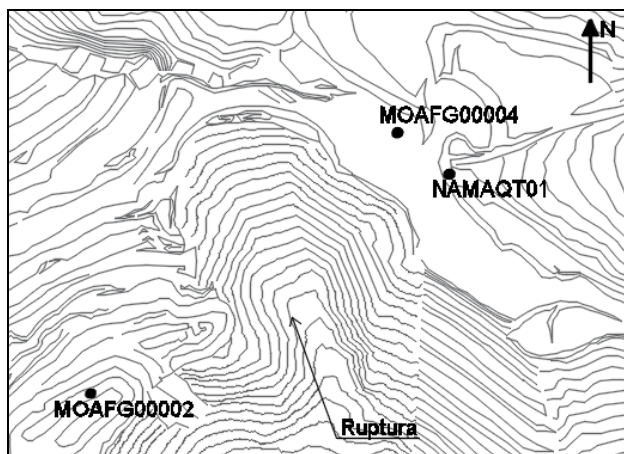


Figura 5. Figura esquemática de localização dos piezômetros monitorados na região da cava de Morro Agudo.

A análise dos dados de monitoramento mostra que o xisto possui elevada saturação, e o piezômetro MOAFG00004 possui leituras de nível d'água a 33-34m de profundidade. Além disso, no mapeamento realizado pela empresa em 2015 encontraram-se pontos de surgências na porção interior da ruptura.

Uma hipótese interpretada para a condição hidrogeológica local é que o xisto (Grupo Nova Lima) foi colocado em nível lateral à formação ferrífera na porção oeste pelo cavalgamento. Com este deslocamento o xisto passou a receber o fluxo subterrâneo lateral do aquífero Cauê. A função do xisto na região da instabilidade teve a ação de bloquear dois aquíferos consideráveis que seriam o itabirito (lateralmente) e o

quartzito (decomposto e fraturado) sotoposto.

Sendo assim, o xisto atuou como aquitardo em relação aos dois aquíferos citados e devido à sua saturação juntamente com a estrutura geológica (cisalhamento) propiciou o processo de instabilização.

3.3 Retroanálise da Ruptura

O estudo de retroanálise foi realizado com a elaboração de uma seção de orientação NNW/SSE com a topografia anterior à ruptura. Nesta estão representados os maciços rochosos caracterizados e o nível d'água interpretado através do monitoramento de piezômetros.

Os parâmetros de resistência dos materiais considerados encontram-se na Tabela 1. Os parâmetros dos materiais alterados foram determinados através dos ensaios triaxiais realizados no ano de 2015. Para os materiais menos alterados e resistentes foram considerados parâmetros de litologias semelhantes de outras minas.

Tabela 1. Parâmetros de resistência dos materiais de caráter isotrópico. Ao lado da sigla do litotipo está indicada a classe de maciço rochoso (Bieniawski, 1989) a que este pertence.

Litotipo	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)
IT * _v	30	70	39
IT II-I	34	500	50
HT* _v	30	70	35
QTM* _v	20	30	32
GN* _v	20	40	32
GN IV	22	80	36
GN III	24	200	40
GN II-I	24	500	45

*IT=itabirito, HT=hematita, QTM=quartzito Moeda, GN=gnaiss.

Tabela 2. Parâmetros de resistência dos materiais anisotrópicos. Ao lado da sigla do litotipo está indicada a classe de maciço rochoso (Bieniawski, 1989) a que este pertence.

Lito	γ (kN/m ³)	$c'_{\perp}$ (kPa)	$\phi'_{\perp}$ (°)	$c'_{//}$ (kPa)	$\phi'_{//}$ (°)
IT _{IV}	30	120	40	70	36
IT _{III}	32	300	45	130	40
HT _{IV}	32	120	38	70	35
QTM _{IV}	22	60	35	30	32
XTNL* _V	20	50	30	28	28
XTNL _{IV}	22	130	35	60	35
XTNL _{III}	26	300	45	150	35
XTBat* _V	20	50	28	30	26
XTBat _{III}	26	250	33	100	30
XTBat _{II-I}	26	500	42	250	33

*XTNL=xisto Nova Lima, XTBat=xisto Batatal.

A retroanálise foi realizada através de uma análise bidimensional utilizando o programa computacional Slide versão 6.0 (Rocscience) por meio do método do equilíbrio limite.

A Figura 6 apresenta a seção geológica-geotécnica interpretada no programa utilizado na análise. A seção de análise mostra que a superfície crítica desenvolveu-se a partir da elevação 1050m estendendo-se até a elevação 960m.

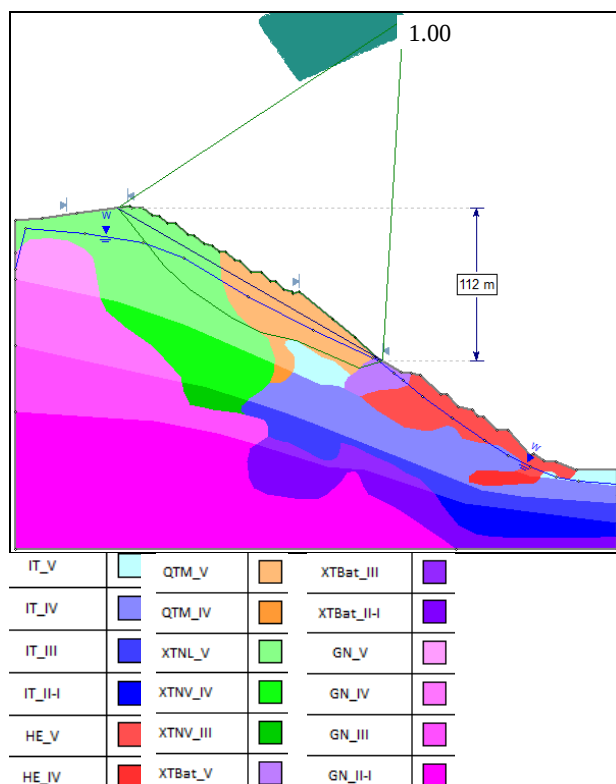


Figura 6. Seção de retroanálise na região da ruptura e legenda de cores dos litotipos da seção.

O fator de segurança obtido de 1.00 demonstra como a geometria dos taludes antes da ruptura associada à condição geológica e hidrogeológica não era satisfatória. Nota-se que a superfície topográfica na região onde saiu a ruptura (pé) no quartzito em contato com xisto possuía uma altura de talude igual a 58m sem definição de bermas e inclinação de 42° de face. De acordo com relatórios internos, é possível que tenha ocorrido um escorregamento anterior de menor proporção no pé do talude onde se observa o nível d'água praticamente aflorante no contato entre xisto e quartzito. Este primeiro escorregamento pode ter agravado a situação nesta região da cava para o deslizamento da grande massa.

4 CORRIDA DE SEDIMENTOS

O alcance dos sedimentos (*debris*) foi de cerca de 500 m desde a base da ruptura, com espalhamento médio lateral de 100 m. Os sedimentos se depositaram no fundo da antiga cava que possuía geometria curva e fechada.

Sabe-se que quando elementos líquidos e gasosos interferem nas propriedades dinâmicas dos sedimentos em transporte podem-se definir esses eventos como corrida ou fluxo de sedimentos. O fluxo de água em materiais porosos diminui a sua resistência devido ao aumento da poro-pressão e serve como um “lubrificador” após principiado o movimento. Acredita-se que no deslizamento teve a contribuição da água devido à surgências observadas no quartzito e ao alto nível piezométrico.

Não se sabe exatamente qual velocidade os sedimentos atingiram durante a ruptura, porém acredita-se que foi da ordem de alguns Km/h. Maiores informações e estudos seriam necessários para poder definir nos diversos critérios de classificação existentes o movimento ocorrido como fluxo de detritos, fluxo de grãos e etc.

As cerca de 800.000 toneladas da massa rompida possuía uma porção de material friável com blocos de itabirito e xisto e mais resistente composta de quartzito.

5 CONCLUSÃO

Levando em conta os dados analisados é possível chegar à interpretação de que a ruptura foi causada por uma combinação de fatores como a geometria do talude, o nível da água subterrâneo, as condições geológicas estruturais e as características geomecânicas dos maciços. Como fatores críticos para a instabilidade descreve-se o xisto Nova Lima de baixa resistência, decomposto e saturado colocado sobre o itabirito por uma falha de empurrão e a condição desfavorável assim criada em termos de hidrogeologia.

A retroanálise foi realizada com base no modelo geomecânico 3D desenvolvido para a região da cava de Morro Agudo e evidenciou como modelos deste tipo devem ser utilizados quando da execução de projetos de abertura e ampliação de cavas a céu aberto.

O fator de segurança obtido próximo à unidade mostrou que os parâmetros utilizados parecem se aproximar bastante da realidade e podem explicar a ruptura. Embora o entendimento do mecanismo desta esteja coerente, a análise foi feita em um programa que permite apenas análises 2D em que não é possível levar em consideração fatores como a pressão gerada pela água lateralmente e da mesma forma, os contrastes laterais entre os diferentes maciços rochosos. Um próximo estudo deve considerar esses fatores em análises 3D principalmente em projetos de ampliação da cava.

O alcance dos debris no fundo da cava mostrou o potencial de perda que rupturas como essas podem gerar quando estão potencializadas pela presença de água no maciço. Assim, controles de monitoramento da água subterrânea são de extrema importância para estabilidade de taludes e para previsibilidades de rupturas com alto potencial de dano pela corrida dos *debris*.

AGRADECIMENTOS

Trabalho realizado com apoio da mineradora Vale que disponibilizou os dados apresentados.

REFERÊNCIAS

- BARTON, N., LIEN, R., LUNDE, J. (1974) *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support*. Rock Mech. Rock Eng., v.6, n.4, p.189-236, 1974.
- BIENIAWSKI, Z. T. (1989) *Engineering rock mass classification*. New York: John Wiley. 248p, 1989.
- SBC. Sérgio Brito Consultoria. (2005) *Retronálise da ruptura na cava de Morro Agudo Complexo Água Limpa*. Relatório interno CVRD, 28p.
- VOGBR Recursos Hídricos e Geotecnia. (2005) *Modelo geomecânico e dimensionamento dos taludes das cavas finais de morro agudo e espigão, relatório técnico*. Relatório interno VALE, 69p.