

Correlação entre a Caracterização Geomecânica e o Monitoramento Microssísmico da Mina Caraíba

João Paulo Silva de Freitas

Mineração Caraíba S/A, Jaguarari/BA, Brasil, joao.paulo@minacaraiba.com

Rodrigo Peluci de Figueiredo

Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto/MG, Brasil, rpfigueiredo@yahoo.com.br

RESUMO: Em 1998, a Mineração Caraíba S/A (Jaguarari-BA) iniciou o método de lavra VRM (*Vertical Retreat Mining*) para a mina subterrânea. Essa técnica tem como princípio dividir verticalmente o corpo mineralizado em painéis de 60 a 25 metros de altura e 15 a 20 metros de comprimento. Após a extração de três painéis é deixado um *sill pillar* horizontal visando garantir a estabilidade global da mina. Considerando-se a complexidade do maciço rochoso, a elevada profundidade e a severa sismicidade induzida pela lavra, os estudos geotécnicos são essenciais para que se garanta a segurança dos trabalhadores e equipamentos e se amplie ao máximo a vida da mina subterrânea. Sendo assim, a atualização da caracterização geomecânica faz-se necessária. Portanto, foi realizada uma campanha de descrição geotécnica de testemunhos de sondagens nos anos de 2014/2015, totalizando 10.063 m de furos, baseada no sistema RMR de Bieniawski (1989), com o objetivo de compreender o comportamento do maciço para os projetos de aprofundamento da mina. Os dados das descrições alimentam uma planilha eletrônica que, que por sua vez, auxiliam na geração de seções geológicas/geotécnicas com o software Datamine 3D. Essas seções foram interpretadas, indicando que a zona de falha principal, anteriormente tangente à mineralização, estaria agora posicionada no seu *hanging wall*, com um mergulho acentuado para oeste a partir da cota -650 (1.100m de profundidade). A partir daí, visando uma maior confiabilidade dos resultados encontrados até então, optou-se por avaliar também os dados do monitoramento microssísmico, captados entre meados de 2002 e meados de 2015, com magnitude acima de 1.0. Com esse levantamento histórico dos eventos sísmicos foi possível detectar um "alinhamento" da sismicidade, não só com a falha evidenciada pelos furos de sondagens, mas também uma verticalização, que indicava uma bifurcação entre ambas. Hudson et. al. (1989) mencionam que os mecanismos do evento podem ser discriminados em um "Diagrama de Tipo da Fonte", no qual o evento está associado à movimentação do maciço rochoso ou a uma radiação sísmica provocada pelo homem (detonação). Os eventos verticais observados foram plotados no Diagrama de Hudson que indicou um deslocamento da falha por cisalhamento e fechamento de trincas. A correlação entre ambas as metodologias foi de suma importância para elaborar o modelo geomecânico tridimensional da Mina Caraíba, que determinou 7 (sete) sólidos geométricos, discriminados pela caracterização do seu maciço rochoso, sendo possível identificar zonas potencialmente instáveis, contribuindo assim, para uma maior confiabilidade geotécnica para os projetos de aprofundamento da mina subterrânea.

PALAVRAS-CHAVE: Mineração Subterrânea; Caracterização do Maciço Rochoso; Monitoramento Microssísmico.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Localização

A Mineração Caraíba está localizada no município de Jaguarari, região norte-nordeste do estado da Bahia (Figura 1). A área dista 465 km de Salvador, 125 km de Petrolina/PE e 108 km de Senhor do Bonfim. O acesso, a partir de Petrolina, é feito pela BR-407, para sul, em um percurso de 80 km até o povoado de Barrinha. A partir daí segue rumo a leste por 45 km, pela BR-314, até o acesso a Mina Caraíba. O acesso também pode ser feito a partir de Senhor do Bonfim, para norte, pela BR-407, em um percurso de 60 km até Barrinha.

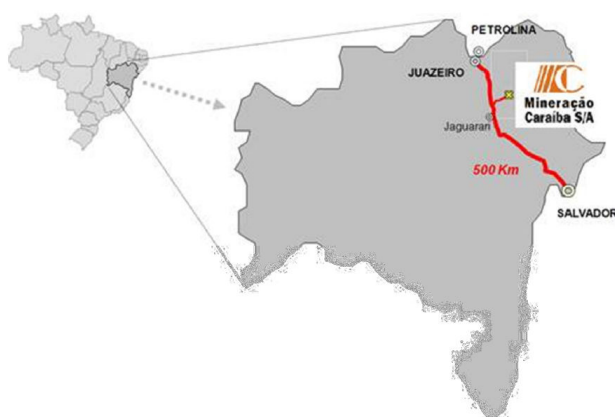


Figura 1. Mapa de localização da Mineração Caraíba S/A.

1.2 Geologia da Área da Mina

A Mina Caraíba encontra-se numa sequência de rochas máficas / ultra-máficas, composta de noritos, gabro-noritos e piroxenitos, encaixada basicamente em gnaisses e migmatitos, correspondendo a uma faixa de terreno Pré-Cambriano do Vale do Rio Curaçá, na porção nordeste do Cráton São Francisco. O Vale do Curaçá está localizado em terrenos de alto grau metamórfico polideformado, compondo uma faixa orientada segundo *trend* Norte/Sul. Estruturalmente, a Mina Caraíba é representada por um sinforme com eixo mineralizado mergulhando 10 a 30° para N-NW, boudinado e com uma falha no seu flanco leste, que constitui um contato tectônico com as encaixantes. Esta falha a leste, que em profundidade mergulha para oeste, está bem delimitada no corpo de minério, sendo a única grande estrutura presente

na área da mina, e que pode ter sido um meio de ligação entre o manto e a crosta.

O modelo geológico que foi idealizado no aprofundamento da mina considera um formato em "Y" (Figura 2). A perna do "Y" é formada pela convergência do corpo mineralizado entre os setores oeste e leste da mina à profundidade aproximada da cota -722m (em torno de 1.170m da superfície – Figura 2). A parte leste continua aparecendo em profundidade. Golder (2012), baseado em estudos geológicos/geotécnicos, indicou que, em maior profundidade, a zona de alteração/zona de falha regional deverá ficar na capa da zona mineralizada (Figura 2).

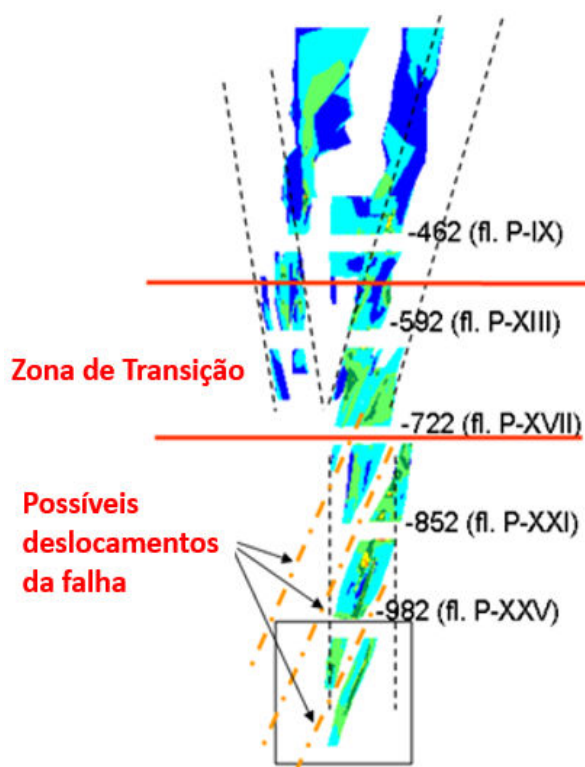


Figura 2. Geometria do corpo mineralizado com a zona de alteração/falha (Golder, 2012).

1.3 Método de Lavra

A partir de 1998 foram adotados realces com alturas de 55 metros para o painel III, 60 metros de altura para os painéis IV e V e 37 metros para o painel VI (Figura 3). O método de lavra então escolhido foi o VRM (*Vertical Retreat Mining*) ou lavra em Recuo Vertical, que tornou possível, posteriormente, a lavra também dos pilares com a implantação do sistema de *paste fill* para o preenchimento dos realces.

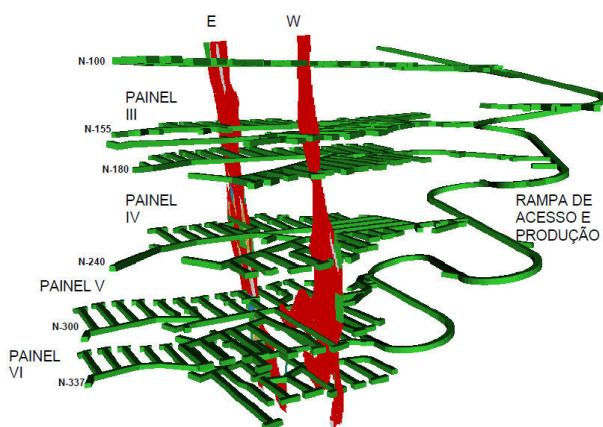


Figura 3. Layout dos painéis III, IV, V e VI, com a utilização do novo método de lavra VRM (Freitas & Figueiredo, 2014).

1.4 Aspectos Geotécnicos

A caracterização geomecânica do maciço rochoso da Mineração Caraíba é baseada no sistema de classificação RMR (*Rock Mass Rating*) de Bieniawski (1989), que permite classificar o maciço rochoso quanto à sua qualidade geotécnica. A metodologia é compreendida pela descrição de testemunhos de sondagens, preenchimento de uma planilha de campo e, posteriormente, alimenta-se uma planilha eletrônica para se elaborar um banco de dados, compreendendo cerca de 54 mil metros de furos descritos geotecnicamente até meados de 2012. O banco de dados é exportado para o software Datamine, onde é arquivado com as informações dos furos. Seções Geotécnicas são geradas a partir daí (Figura 4), informando o respectivo grupo litológico/geomecânico da Mina Caraíba, os quais podem ser divididos em cinco categorias: gnaiss, piroxenito, gabro-norito, metassomatito e calcossilicática, que são representados por colorações diferentes nas linhas dos furos (Figura 4). Os valores de RMR são numericamente apresentados ao lado direito dos furos e as zonas de falhas e *empastilhamentos* são expostos na forma de barras nas cores vermelha e azul, respectivamente, ao lado esquerdo dos furos (Figura 4).

1.5 Sistema de Monitoramento Microsísmico

A lavra e as elevadas tensões decorrentes do aprofundamento da mina subterrânea foram

condicionantes para o aumento da frequência e da intensidade de eventos sísmicos no subsolo. Foi assim que surgiu a necessidade de se instalar um sistema de monitoramento microsísmico (Figura 5), para se determinar com precisão a localização das fontes desses eventos sísmicos, naturais ou induzidos, bem como suas magnitudes e a potencial interferência na operacionalidade da mina (Mendecki, 1997).

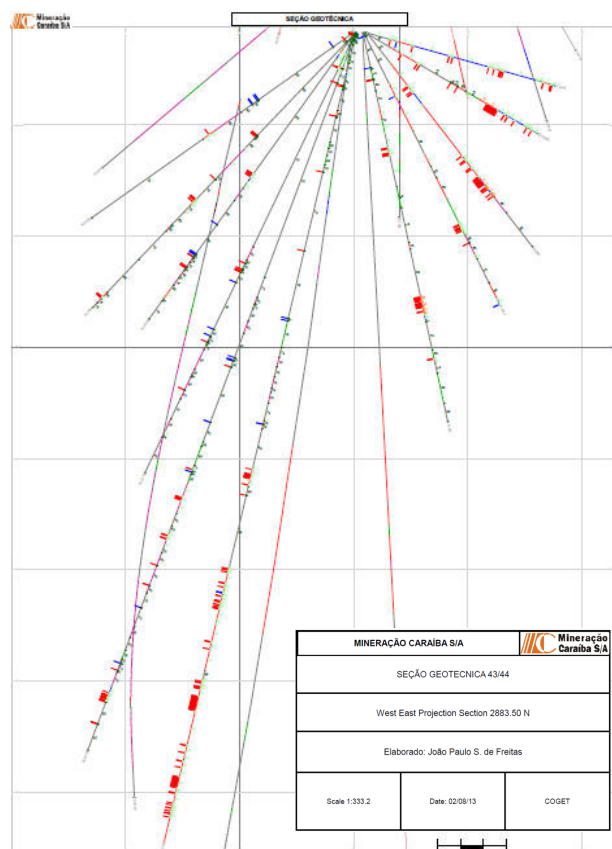


Figura 4. Modelo da seção geotécnica elaborada (Freitas & Figueiredo, 2014).

O objetivo principal seria fornecer informação contínua sobre a real situação de sismicidade na Mina Caraíba. O sistema é composto de sensores instalados por toda a mina, que enviam sinais de diferentes pontos, automaticamente para caixas de aquisição de dados. Essas caixas acumulam e processam tais informações e os enviam a um computador central. O computador usa um conjunto de programas específicos que permitem processar, interpretar e visualizar os eventos captados em todo o *layout* da mina, para que se obtenha uma compreensão integrada dos fenômenos físicos envolvidos.

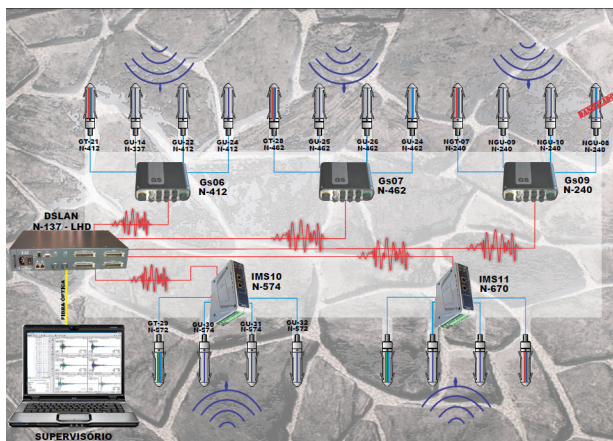


Figura 5. Desenho esquemático representando o monitoramento microssísmico da Mineração Caraíba.

2 CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA DA MINA CARAÍBA

A atualização da classificação geomecânica da Mina Caraíba, visa melhor compreender o comportamento do maciço no aprofundamento da mina, em especial nas escavações projetadas. Foram determinados os seguintes critérios para o estudo proposto:

- Descrição geotécnica de testemunhos de sondagens, baseado no sistema RMR de Bieniawski (1989), compreendendo o projeto de aprofundamento da mina, abaixo da cota -412 (em torno de 860m de profundidade);
- Mapeamento Geotécnico-Estrutural de campo para as galerias mais profundas até então desenvolvidas, com aplicação do programa Dips 6.0 da Rocscience, para apresentar a orientação das descontinuidades mapeadas;
- Utilização do monitoramento microssísmico da mina subterrânea, visando estabelecer as macro-zonas de falhas, detectadas pelos eventos sísmicos desde a implantação do sistema;
- Elaboração de *wireframes* (sólidos) no software Datamine Studio 3.0, para cada tipo de maciço rochoso estudado/interpretado na mina.

2.1 Descrição Geotécnica de Testemunhos de Sondagens

Foram descritos geotecnicamente 65 furos de sondagens, totalizando 10.063m de testemunhos em 2014/2015 pela equipe interna de Geotecnia da Mineração Caraíba. A descrição desses furos

foi delimitada pelo *hanging wall* e *foot wall* da zona mineralizada, compreendidos no projeto de lavra para o aprofundamento da mina. Esses dados foram agregados aos já descritos anteriormente a esse estudo, acrescentando assim, mais informações para caracterização geomecânica. Com auxílio do software Datamine Studio 3.0, realizou-se um estudo estatístico, a partir do banco de dados oriundos da descrição, gerando um histograma (Figura 6) do índice RMR de todos os litotipos da Mina Caraíba, resultando, na sua grande maioria, num maciço tipo II (boa qualidade).

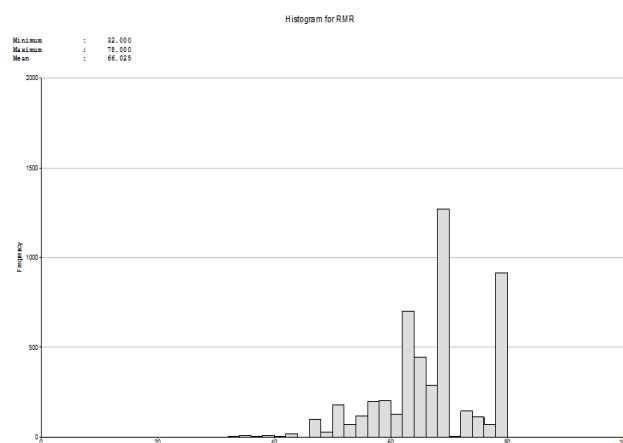


Figura 6. Histograma de RMRs para todos os grupos geomecânicos/litológicos da Mina Caraíba.

O banco de dados gerado na campanha de descrição geotécnica de 2014/2015 foi agrupado com os anteriormente existentes, totalizando pouco mais de 60.000m de furos descritos. Sendo assim, elaboraram-se seções geotécnicas verticais com direções E-W e espaçamento de 22.5m, conforme a malha de sondagem. As seções foram interpretadas abaixo da cota -350 (800m de profundidade), onde se concentram as informações geomecânicas mais úteis para o projeto do aprofundamento da Mina Caraíba.

Praticamente em todas as seções atualizadas há indicações de rocha mediana a pobre segundo a forma de um “X”. Contudo, nos seus pontos adjacentes, há evidências de uma rocha de boa qualidade a mediana.

2.2 Mapeamento Geotécnico-Estrutural

O mapeamento geotécnico-estrutural do aprofundamento da Mina Caraíba, foi baseado no sistema RMR de Bieniawski (1989),

adotando para coleta de dados em campo, uma planilha impressa, com as seguintes informações sobre o maciço rochoso: resistência da rocha, RQD, condição da água subterrânea, espaçamento e condições das descontinuidades (persistência, rugosidade, abertura, preenchimento, alteração), orientação e atitudes das principais estruturas.

Os níveis mais profundos desenvolvidos na mina subterrânea antes do presente estudo, foram os selecionados para o mapeamento: os níveis -670 (1126m), -707 e -732, considerados níveis de produção, e, por fim, a rampa de aprofundamento na cota -747. A Tabela 1 mostra os índices de classificação geomecânica do maciço rochoso da Mina Caraíba para o seu aprofundamento, com base nos valores de RMR encontrados para o corpo mineralizado, encaixante e zona de falha. A qualidade do maciço foi também expressa em termos do Q de Barton e do GSI , obtidos pelas expressões (Singh & Goel, 2011):

$$RMR = 9 \ln Q + 44 \quad (1)$$

$$GSI = RMR'_{89} - 5 \text{ para } RMR \geq 23 \quad (2)$$

Onde, RMR'_{89} é o RMR para maciço seco e sem ajuste por orientação das descontinuidades.

Tabela 1. Caracterização geomecânica com base no mapeamento de campo.

	RMR	Q	RMR'	Q'	GSI
Minério	57	4.24	62	7.4	57
Encaixante	66	11.5	71	20	66
Zona de Falha	35	0.37	51	2.2	46

Os dados de atitudes e direções das fraturas coletadas em campo foram lançados e tratados no software Dips 6.0 da Rocscience, gerando-se diagramas de isocontornos e de rosetas para as galerias mapeadas (Figura 7).

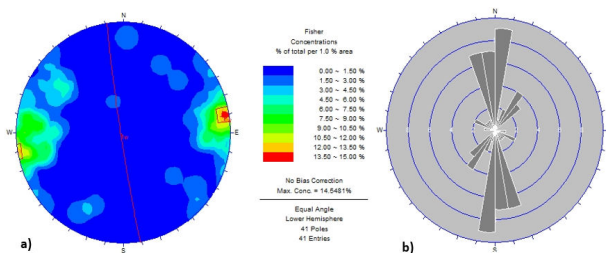


Figura 7 a) Diagrama de isocontornos; b) Diagrama de rosetas

Observa-se uma concentração de medidas de pólos leste e oeste no diagrama de isocontornos, consequentemente, com mergulhos para oeste e leste respectivamente. No diagrama de rosetas, existe uma predominância das estruturas no sentido norte/sul, resultados estes, comumente encontrados historicamente na Mina Caraíba.

2.3 Monitoramento Microsísmico para Caracterização Geomecânica

As escavações subterrâneas provenientes da mineração causam deformações elásticas e inelásticas nas circunvizinhanças do seu maciço rochoso. A energia potencial acumulada nesse processo pode se descarregar gradualmente ou até mesmo ser liberada de forma repentina durante um processo de deformação inelástica (Walsh, 1977). Um evento sísmico decorre da súbita liberação de energia de deformação elástica dentro de um dado volume de rocha, originando uma fonte sísmica que irradia ondas sísmicas detectáveis (Mendecki et al., 1999).

Hudyma et al. (2003) relatam 367 eventos sísmicos monitorados na mina de ouro Mount Charlotte na Austrália, com magnitude acima de 0 (zero), em um período de tempo de 5 anos. Observa-se que a localização e o número de eventos sísmicos variam consideravelmente de um ano para outro, sendo detectado que a grande maioria está associada aos planos de falha e ao aumento da profundidade. Em razão disso, foram compilados, com a utilização do software *IMS Vantage*, os eventos sísmicos monitorados entre os meados de 2002 e 2015 (Figura 8), com magnitudes maiores que 1 (um), totalizando 1004 (mil e quatro) eventos para o período, ocorridos na Mina Caraíba.

Observou-se a existência de um alinhamento verticalizado dos eventos sísmicos até a cota -3.632. Sendo assim, foi gerado um sólido para filtragem desses sismos pelo programa *IMS Vantage* (ver Figura 9(a)), isolando-se 298 eventos incidentes nesse alinhamento (Figura 9(b)).

Exportou-se para o software *IMS Vantage* a superfície da falha principal (em azul) da Mina Subterrânea (Figura 10), interpretada em 2012, com base na descrição geotécnica dos testemunhos de sondagens daquele período.

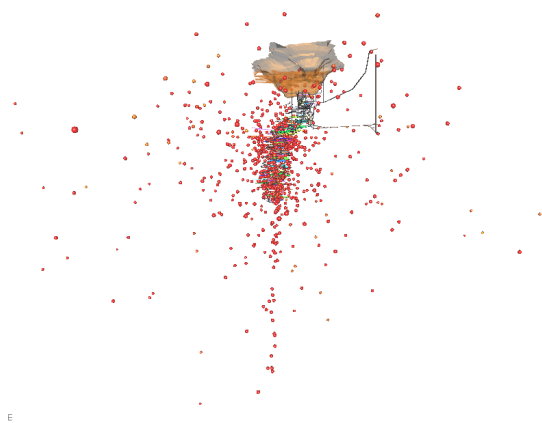


Figura 8. Eventos sísmicos ocorridos entre meados de 2002 e 2015, com magnitude acima de 1 (um), na Mina Caraíba (obs: a posição das esferas indicam a localização dos eventos).

Nota-se, na Figura 10, que o alinhamento vertical dos eventos sísmicos não coincide com o segmento da falha principal da Mina Subterrânea, que havia sido interpretado em 2012. Em vista disso, foi possível se detectarem duas orientações distintas de concentração dos sismos: uma delas corresponde à verticalização já mencionada e, a outra, a um alinhamento mais suave de eventos, nas proximidades da zona de alteração/falha que foi interpretada com os furos de sondagem.

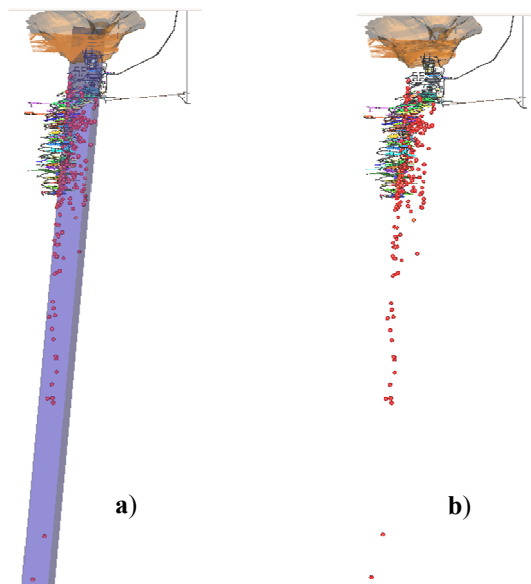


Figura 9. a) Verticalização dos eventos sísmicos e o sólido de filtragem; b) verticalização dos eventos sísmicos sem o sólido de filtragem.

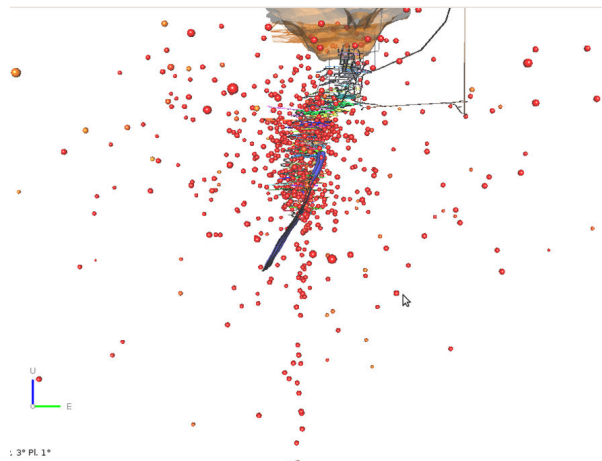


Figura 10. Falha principal (em azul) da mina subterrânea com os eventos sísmicos acima de 1 (um).

O mecanismo que gera uma fonte sísmica pode ser caracterizado pelo "Tensor de Momentos Sísmico" (Jost & Herrmann, 1989), que permite estimar a magnitude de cada evento, identificar a direção das deformações principais nas suas imediações, bem como, o potencial plano de falha a ela associado. Hudson et al. (1989), elaboraram um "diagrama de tipo da fonte" (source-type plot - Figura 11), que permite identificar graficamente o mecanismo do sismo, sinalizando se ocorreu uma movimentação por cisalhamento simples, plotada no centro (DC), uma deformação volumétrica (originada por explosão ou implosão - por exemplo, devida ao colapso de uma escavação), em ordenadas, ou, nas abscissas, se corresponde à abertura (+ CLVD) ou ao fechamento (-CLVD) de trincas.

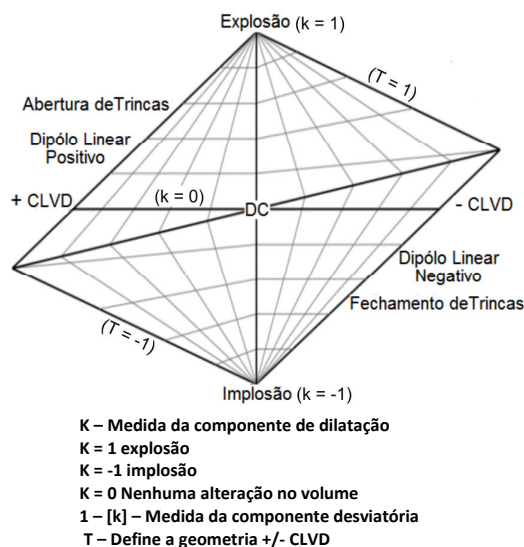


Figura 11. "Diagrama de Tipo da Fonte", utilizado para definir o mecanismo sísmico (Hudson et al., 1989).

Com base no Tensor de Momentos Sísmico, que quantifica os esforços (= dipólos com ou sem binários) atuantes na geração das deformações inelásticas da fonte do evento, é possível se identificar as suas respectivas componentes, que plotadas no diagrama da Figura 11, permitem caracterizar os mecanismos preponderantes. Tendo isso em vista, selecionaram-se alguns eventos sísmicos oriundos da verticalização e, com auxílio dos softwares da IMS, JDI e Vantage, plotaram-se tais eventos no diagrama de Hudson et al. (1989), buscando-se compreender o mecanismo associado às respectivas fontes sísmicas (Figura 12).

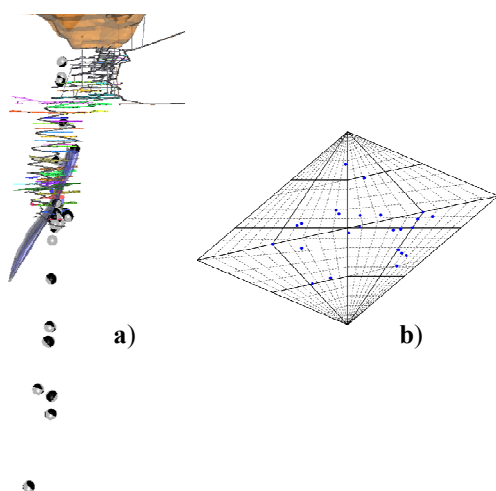


Figura 12. a) Eventos verticais selecionados; b) plotagem dos eventos (em azul) no "Diagrama de Tipo da Fonte" de Hudson et al. (1989).

Observa-se uma ligeira dispersão nos dados plotados, mas a tendência é para um mecanismo de cisalhamento sobre falha, associado a fechamento de descontinuidades. Isso sugere que a verticalização dos eventos sísmicos tenha sido gerada pela movimentação do maciço rochoso na alteração da zona de falha para esse alinhamento vertical.

3 MODELO GEOMECÂNICO TRIDIMENSIONAL DA MINA CARÁIBA

O modelo geomecânico tridimensional foi elaborado por triangulação de *strings*, que foram interpretadas tomando por base a descrição geotécnica de testemunhos, o mapeamento estrutural-geotécnico de campo e,

agora, também o monitoramento microssísmico. A compilação desses dados gerou 39 seções (Figura 13), as quais foram manipuladas e ajustadas no software Datamine Studio 3.0, que, em sequência, processou a ligação entre as strings, produzindo assim, sólidos (wireframe) para cada zoneamento de maciço rochoso delimitado na interpretação.

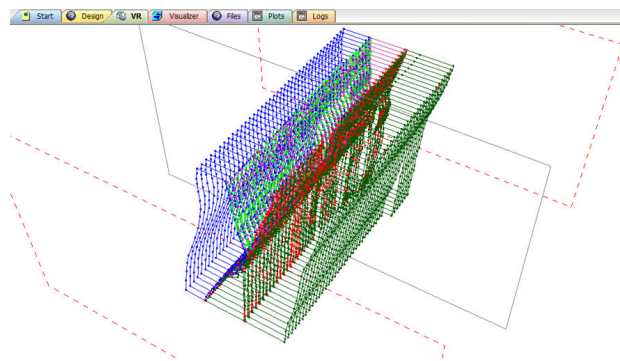


Figura 13. *Strings* geradas pela compilação da descrição de testemunhos, mapeamento geotécnico de campo e monitoramento microssísmico.

Com a integração das seções verticais, foram criados 7 (sete) arquivos de sólidos geométricos, delimitados pelas características geomecânicas dos maciços rochosos, sendo classificados e denominados da seguinte forma:

- *Wirefr_Tipo_II_W* é um maciço rochoso de boa qualidade, tipo II (Bieniawski, 1989), com valores de RMR predominantemente entre 63 a 73, tendo evidências de tensões elevadas (empastilhamentos);
- *Wirefr_Tipo_II_III_W* é um maciço classificado como tipo II a III, tendo um RMR variando de 46 a 63, que em muitas ocasiões, tangencia a mineralização da porção oeste da mina, sendo considerada a Falha Oeste da mina subterrânea;
- *Wirefr_Tipo_II_III_C* é classificado como um maciço rochoso tipo II a III, estando o seu RMR entre 51 a 78 e apresentando ocorrências de faturamento por tensões (empastilhamentos); sua localização está cercada pelas mineralizações oeste e leste da mina, tendo um formato em "V";
- *Wirefr_Tipo_III_IV_E* é considerada a zona de falha principal da mina subterrânea, com maciço rochoso tipo III a IV, chegando a um RMR com o valor de 36 e tendo a ocorrência de grandes fraturamentos; tangencia

em muitos casos a mineralização leste, até a cota -650, a partir da qual se posiciona no hanging wall do minério. Sua direção é norte/sul, com um mergulho alto para oeste e localização na porção leste da mina.

- *Wirefr_Tipo_II_III_E* é uma porção de maciço rochoso situada no *foot wall* da zona de falha leste, na qual os valores de RMR estão entre 62 e 78, para o estéril, e, nos trechos mineralizados, entre 54 e 68. Observou-se ao longo da sua extensão regiões de fraturamentos e tensões elevadas (empastilhamento).

- *Wirefr_Tipo_II_III_A* está localizado no *hanging wall* da falha leste, abaixo da cota -535, considerado um maciço rochoso de mediana a boa qualidade, tendo o seu sólido geométrico em formato de um “V” invertido;

- *Wirefr_Tipo_III_IV_perna* é designada no presente estudo como a “perna da falha”, sendo considerada uma continuidade, com um ângulo mais suave (em torno de 45°), da falha principal (leste) da mina, tendo suas bifurcações entre os níveis -535 a -650.

A Figura 14 apresenta o Modelo Geomecânico Tridimensional da Mina Caraíba, com as junções dos 7 (sete) sólidos elaborados, em perfil.

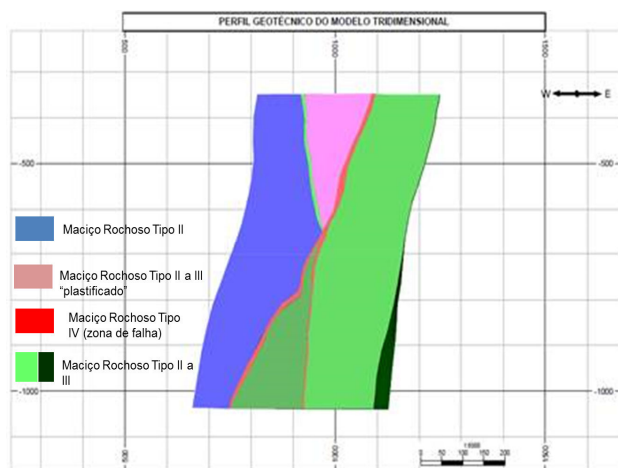


Figura 14. Modelo geomecânico tridimensional da Mina Caraíba em perfil.

4 CONCLUSÕES

Até o presente estudo, o modelo geotécnico da mina subterrânea apresentava um formato de “Y”, com falhas a oeste e a leste mergulhando em sentidos opostos, sendo que a última,

estendia-se pelos níveis mais profundos. Com os estudos aqui apresentados, formulou-se um novo conceito para o modelo, tendo a falha principal leste duas bifurcações em torno da cota -650, sendo uma de sentido mais verticalizado e a outra num segmento de mergulho mais suave, o que configura um formato em “X”. Isso permitiu obter maior confiabilidade geotécnica para os projetos de aprofundamento da Mina Caraíba.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Mineração Caraíba S/A pela oportunidade de desenvolvimento do estudo e pelo apoio incondicional prestado.

REFERÊNCIAS

- Bieniawski, Z.T. (1989). *Engineering Rock Mass Classification*. Wiley, New York, 251p.;
- Freitas, J. P. S. de & Figueiredo, R. P. de; (2014). *Análise de Riscos de Projetos de Realces da Mineração Caraíba*. VI Simpósio Brasileiro de Mecânica de Rochas, Goiânia, Goiás, 6p.;
- Golder, (2012). *Aprofundamento da Mina Caraíba Abaixo do Nível -412*. Relatório: Golder Associates, Ontario, Canada, 63 p.;
- Hudson, J., Pearce, R. and Roberts, R., (1989). *Source type plot for inversion of the moment tensor*. J. Geophys. Res., 94: 765-774.
- Hudyma, M.R., Heal, D., and Mikula, P. (2003). *Seismic Monitoring in Mines: Old Technology, New Applications*. In Proceedings 1st Australasian Ground Control in Mining Conference, Sydney, p. 201- 218;
- Jost, M. L. & R. B. Herrmann (1989). *A Student's Guide to and Review of Moment Tensors*. Seismological Research Letters, 60(2): 37-57;
- Mendecki, A. J., (1997). *Seismic Monitoring in Mines*. Chapman-Hall, London, 262 p.;
- Mendecki, A. J., van Aswegwn G., and Mountfort P. (1999). *A Guide to Routine Seismic Monitoring in Mines. A Handbook on Rock Engineering Practice for Tabular Hard Rock Mines*. Edited by A. J. Jager and J. A. Ryder, The Safety in Mines Research Advisory Committee, Johannesburg, chap. 9, pp. 287-309;
- Singh, B. & Goel, R. K., (2011). *Engineering Rock Mass Classification*. Butterworth-Heinemann, Oxford, USA, pp. 45 – 61;
- Walsh, J. B. (1977). *Energy Changes due to Mining*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 14: 25-33.