

Estudos Geomecânicos de uma Cavidade em Formação Ferrífera Localizada no Município de Itabirito (MG)

Brandi, Iuri
Vale, Nova Lima, Brasil, iuri.brandi@vale.com

Araújo, Ramon
Vale, Nova Lima, Brasil, ramon.araujo@vale.com

Frigo, Fernando
Vale, Nova Lima, Brasil, fernando.frigo@vale.com

Sebastião, Cristiane Silva
Coffey, Belo Horizonte, Brasil, cristiane.sebastiao@coffey.com

Ferreira, Mauri Lopes
Coffey, Belo Horizonte, Brasil, mauriferreira@uol.com.br

Dias, Leonardo Santana de Oliveira
Coffey, Belo Horizonte, Brasil, leonardo.santana@coffey.com

RESUMO: Estudos de estabilidade de cavernas ou cavidades naturais subterrâneas desenvolvidas em formações ferríferas vêm se tornando cada vez mais importantes à viabilização de empreendimentos minerários, principalmente no estabelecimento das suas áreas de influências, conforme reza a Resolução CONAMA 347/2004. Nesse sentido, foi realizada uma série de estudos geomecânicos na cavidade MP-07, desenvolvida em formação ferrífera, localizada nas proximidades da mina do Pico e mina do Galinheiro, município de Itabirito (MG), local de extração de minério de ferro pela empresa Vale. Estes estudos, realizados a partir do mapeamento em escala de detalhe dos aspectos estruturais, geotécnicos e geomecânicos das litologias presentes na cavidade e em sua área de entorno (COFFEY, 2014), permitiram identificar as variáveis condicionantes presentes nesta cavidade para a avaliação das suas condições de estabilidade física, através de metodologias consagradas na área de geotecnia. A coleta dos dados em campo contemplou os parâmetros geotécnicos/geomecânicos compreendidos no sistema de classificação de maciços rochosos Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski (1989) e também na metodologia desenvolvida por Barton para definição do índice Q de qualidade de rochas. Os resultados obtidos foram tratados por meio da metodologia desenvolvida por Dennis H. Laubscher (1990) para a obtenção do RMR, de tal maneira que fossem definidos para os diferentes domínios geotécnicos os valores de MRMR (Minning Rock Mass Rating) e DRMS (Design Rock Mass Rating) e os parâmetros que permitiram avaliar as condições de estabilidade das cavidades a partir do índice de estabilidade ou raio hidráulico das aberturas analisadas. Os parâmetros geomecânicos obtidos a partir dos dados de mapeamento, foram tratados com o software RocLab da Rocscience para obtenção dos índices físicos que foram utilizados nas simulações de comportamento para verificação das condições de estabilidade das aberturas das cavidades a partir da utilização do software PHASE 2, versão 7.0 da Rocscience. Os resultados obtidos com esta análise permitiram a definição de três domínios geotécnicos e a avaliação das condições de estabilidade da cavidade MP-07. Este trabalho permitiu

que as análises e metodologias consagradas pela geotecnia tradicional fossem testadas e validadas para o ambiente de cavidades subterrâneas rasas em formações ferríferas. Os resultados obtidos mostram a aplicabilidade das metodologias utilizadas para estudos do comportamento geomecânico do ambiente de cavidades naturais subterrâneas em formação ferrífera.

PALAVRAS-CHAVE: cavidades, formação ferrífera, geomecânica de cavidades, estabilidade física.

1 INTRODUÇÃO

O entendimento do comportamento geomecânico do maciço de desenvolvimento de cavidades naturais subterrâneas é hoje de fundamental importância para a mineração de ferro, uma vez que seu conhecimento e caracterização são determinantes para a definição dos horizontes do empreendimento minerário no que tange à necessidade de manutenção da integridade física de algumas cavidades.

Os estudos geomecânicos fornecem subsídios para a compreensão da relação entre operação de minas a céu aberto e impactos físicos gerados em cavidades naturais e possibilitam o desenvolvimento de projetos de monitoramento da estabilidade física das cavidades durante as operações de lavra. Desta forma são delimitados os fatores determinantes para a definição dos procedimentos operacionais, que permitirão a convivência entre a lavra e a manutenção da integridade das cavidades.

Como forma inicial de investigar a influência das operações de mina na estabilidade de cavidades circunvizinhas, este trabalho apresenta os resultados de estudos geomecânicos desenvolvidos na cavidade MP-07 e em sua área de entorno, que compreenderam desde o mapeamento de campo até análises de estabilidade.

A cavidade MP-07 localiza-se nas proximidades das minas do Pico e do Galinheiro, no município de Itabirito (MG), local de extração de minério de ferro pela empresa Vale (Figura 1).



Figura 1. Localização das cavidades MP-07.

2 METODOLOGIA

Os estudos geomecânicos desenvolvidos para a cavidade MP-07 foram iniciados a partir do mapeamento, em escala de detalhe dos aspectos estruturais, geotécnicos e geomecânicos das litologias presentes na cavidade e área de entorno envolvidas no projeto, o que permitiu identificar as variáveis geotécnicas presentes nesta cavidade para a avaliação das condições de estabilidade física da mesma.

Nas atividades de campo foram levantados dados, através de uma planilha que contemplou parâmetros geomecânicos compreendidos no sistema de classificação de maciços rochosos Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski (1989), e também na metodologia desenvolvida por Barton para definição do índice Q de qualidade de rochas.

Os dados levantados em campo foram aplicados ao sistema de classificação RMR de Bieniawski (1989) e Q de Barton, e tratados com o software CLASROCK 32, de forma a avaliar os maciços da área com relação ao comportamento geomecânico. Os resultados obtidos a partir desta análise permitiram distinguir classes geomecânicas diferenciadas

nos maciços da área, possibilitando assim, definição de domínios geotécnicos distintos.

Os resultados obtidos nos levantamentos de campo e do mapeamento da cavidade MP-07 foram tratados também através da metodologia desenvolvida por Dennis H. Laubscher (1990) para a definição dos parâmetros de resistência do maciço a partir do RMR, de tal maneira que fossem definidos para os diferentes domínios geotécnicos valores de MRMR (Mining Rock Mass Rating) e DRMR (Design Rock Mass Rating). Estes parâmetros permitiram definir o índice de estabilidade através da metodologia de definição do raio hidráulico da abertura subterrânea e identificar as condições de estabilidade e auto portabilidade para os vãos atuais das cavidades.

Os parâmetros geomecânicos foram também tratados com o software RocLab da Rocscience, para obtenção dos índices físicos que foram utilizados nas simulações de comportamento para verificação das condições de estabilidade das aberturas das cavidades a partir da utilização do software PHASE 2, versão 7.0 da Rocscience.

3 ESTUDOS GEOMECÂNICOS

3.1 Caracterização geológica

A cavidade MP-07 localiza-se na região de contato entre canga e formação ferrífera, sendo a formação ferrífera (itabirito lixiviado), o litotipo predominante nesta cavidade, aflorando em todo salão mais a norte da cavidade e na porção basal das paredes do salão mais a sul (Figura 2).



Figura 2. Formação ferrífera (itabirito lixiviado) – Cavidade MP-07.

A canga detrítica aflora no teto do salão mais a sul da cavidade (Figura 3). Na porção central aflora também o litotipo localmente denominado hematitito, que conforme mencionado em item anterior, corresponde a minério compacto de alto teor, geralmente localizado em eixos de dobras, que se destaca como “pontões” nos taludes da mina.

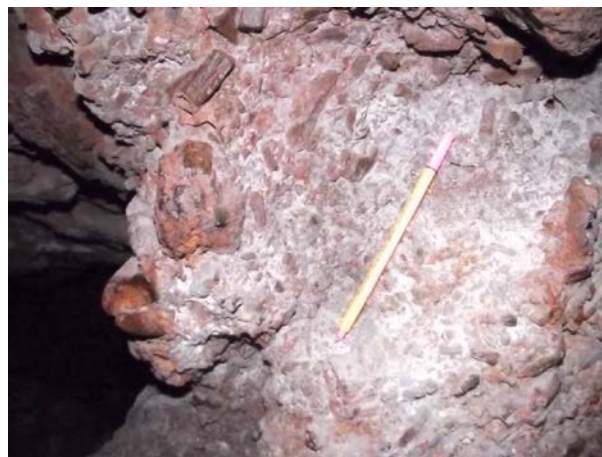


Figura 3. Canga Detrítica – Cavidade MP-07.

A presença do litotipo hematitito (Figura 4), evitou o avanço do processo erosivo de formação da cavidade no trecho onde este aflora, conformando neste local, um conduto mais estreito do que no restante da cavidade. Tal fato deve-se a maior resistência deste material.



Figura 4. Hematitito – Caverna MP-07

3.1 Classificação geomecânica

Com o mapeamento de campo, aplicando-se os métodos do RMR de Bieniawski (1989), e Q de Barton, foram obtidas as classes geomecânicas para os litotipos mapeados no interior da caverna a partir do tratamento dos dados com o software CLASROCK 32. Os resultados obtidos a partir da classificação geomecânica permitiram a definição de três domínios geotécnicos.

O primeiro domínio geotécnico definido é aquele em que o tipo litológico é a canga, formando uma carapaça muito rígida. Este domínio geotécnico apresenta como característica principal valores elevados de resistência mecânica, sendo estimados valores de resistência à compressão uniaxial em torno de 120 MPa.

No que diz respeito ao fraturamento presente, a canga apresenta aspecto maciço, com espaçamento de fraturas centimétricos a decimétricos. Considerou-se um espaçamento médio, entre 0,06 m e 0,2 m.

Esta caverna se localiza muito próximo à superfície onde predomina uma carapaça de canga de alta resistência, conferindo boas condições de auto portabilidade no teto.

A partir dos dados obtidos nos trabalhos de caracterização e classificação geomecânica, obteve-se para este domínio, os seguintes parâmetros de resistência e índices físicos:

RMR = Variando desde 50 a 53
 Q de Barton = 14,67
 MRMR (Minning Rock Mass Rating) = 38

RMS (Rock Mass Strength) = 45,24 MPa
 DRMS (Designed Rock Mass Strength) = 34,69 MPa
 GSI (Geological Strength Index) = 58

O segundo domínio geotécnico definido é aquele em que o tipo litológico predominante é a hematita compacta. Este domínio geotécnico apresenta como característica principal valores ainda mais elevados de resistência mecânica, sendo estimados valores acima de 200 MPa. Para o caso das cavernas estudadas, em função da alteração presente, considerou-se para efeito dos trabalhos de caracterização e de classificação geomecânica um valor de 160 MPa.

No que diz respeito ao fraturamento presente, este tipo litológico apresenta padrão de fraturamento menos acentuado, aspecto maciço, e espaçamento de fraturas normalmente superiores a 0,20 m; considerou-se um espaçamento médio entre 0,015 m e 0,25 m.

Devido a sua elevada resistência mecânica, os pilares e eventualmente tetos das cavernas estão implantados neste tipo litológico. Importante observar que na caverna estudada, este tipo de rocha tem localização e presença restrita.

A partir dos dados obtidos nos trabalhos de caracterização e classificação geomecânica, obteve-se para este domínio, os seguintes parâmetros de resistência e índices físicos:

RMR = Variando desde 54 a 63
 Q de Barton = 20,53
 MRMR (Minning Rock Mass Rating) = 43
 RMS (Rock Mass Strength) = 60,32 MPa
 DRMS (Designed Rock Mass Strength) = 48,86 MPa
 GSI (Geological Strength Index) = 63

O terceiro domínio geotécnico definido é aquele em que o tipo litológico predominante é um itabirito lixiviado e endurecido. Este domínio geotécnico apresenta como característica principal valores inferiores aos outros dois tipos litológicos para resistência mecânica, exibindo valores da ordem de 80 MPa.

No que diz respeito ao fraturamento

presente, este tipo litológico apresenta padrão de fraturamento elevado, aspecto bandado e espaçamento de fraturas normalmente inferiores a 0,010 m; considerou-se um espaçamento médio, entre 0,006 m e 0,01 m.

Devido ao elevado grau de fraturamento e consequente comprometimento dos parâmetros de resistência do maciço, este se mostra muito susceptível aos processos erosivos, sendo que as cavidades desenvolvem-se através destes processos de alteração.

A partir dos dados obtidos nos trabalhos de caracterização e classificação geomecânica obteve-se para este domínio os seguintes parâmetros de resistência e índices físicos:

RMR = Variando desde 31 a 43

Q de Barton = 2,33

MRMR (Minning Rock Mass Rating) = 24

RMS (Rock Mass Strength) = 18,24 MPa

DRMS (Designed Rock Mass Strength) = 14,77 MPa

GSI (Geological Strength Index) = 53

4 AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE ESTABILIDADE

4.1 Índice de estabilidade

Os valores obtidos de MRMR foram utilizados para verificação da estabilidade do vão atual da cavidade através da correlação entre MRMR e o tamanho do vão, definido pelo raio hidráulico ou índice de estabilidade, que é a área da abertura dividida pelo seu perímetro.

A cavidade MP-07 apresenta o teto implantado predominantemente em canga ou hematita compacta, maciços que apresentam valores de MRMR entre 38 e 43 para as avaliações de estabilidade. Para utilização do ábaco, utilizou-se do valor inferior de 38.

Para esta condição, verificam-se no ábaco que para aberturas com valores de raio hidráulico inferiores a 8,0 m, as condições de estabilidade das aberturas são adequadas, sendo que um intervalo entre 8,0 m e 17,0 m apresenta uma condição de transição, entre a estabilidade e o *caving*.

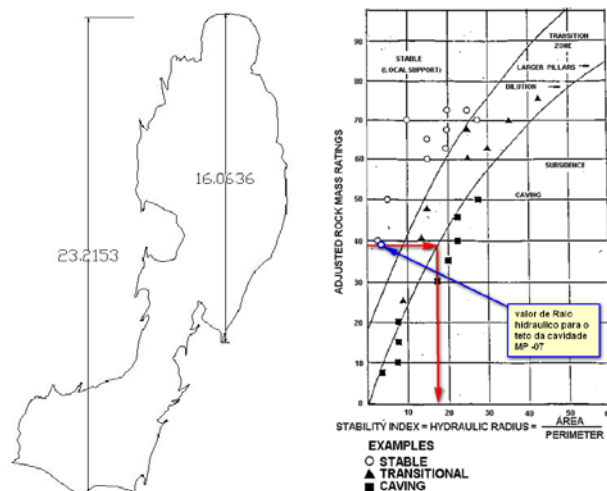


Figura 5. Dimensões (m) e Ábaco de Raio Hidráulico – Cavidade MP-07

Na Figura 5 acima, pode-se observar que as dimensões da cavidade MP-07, são de aproximadamente 24,0m de comprimento, e uma largura média em torno de 8,0m. Com estas dimensões, o valor de raio hidráulico encontrado para a exposição atual de teto, será de:

$$RH = 24(8) / 2(24) + 2(8) = 3,0m \quad (1)$$

O valor encontrado de 3,0m para raio hidráulico da cavidade MP-07 é muito inferior aos 8,0m possíveis de se praticar com condições de auto portabilidade, e, portanto, indicam uma situação confortável no que respeita às suas condições gerais de estabilidade.

Na Figura 7, que mostra as dimensões da cavidade, pode-se observar que as exposições máximas de teto estão limitadas a 11,0m de comprimento, por aproximadamente 6,0m de largura, o que define a seguinte condição para raio hidráulico máximo:

$$RH = 11(6) / 2(11) + 2(6) = 1,94m \quad (2)$$

Para este valor encontrado, podem-se observar no ábaco da Figura 7 que são confortáveis as condições de estabilidade desta cavidade, uma vez que o valor máximo encontrado para raio hidráulico é de aproximadamente 50% do valor do limite de auto portabilidade.

4.2 Análise de tensão e deformação

As análises de tensão x deformação para verificar as condições de estabilidade destas cavidades foi realizada com o software PHASE 2, versão 7.0, a partir dos parâmetros de resistência das classificações geomecânicas, e também dos índices geotécnicos obtidos com o software Roclab, apresentados nas figuras 6 a 8.

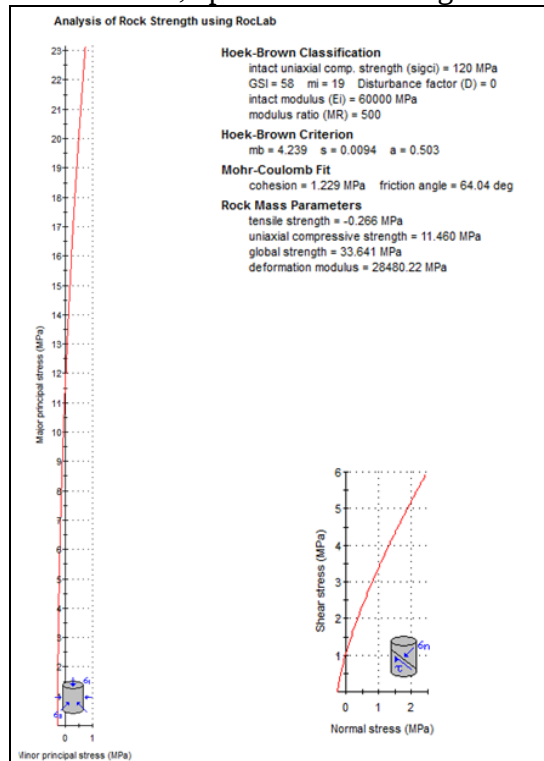


Figura 6. Índices Geotécnicos da Canga

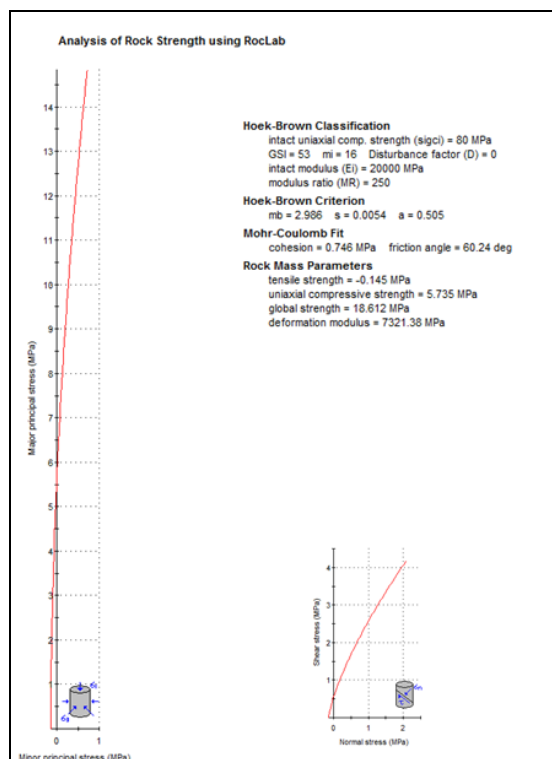


Figura 7. Índices Geotécnicos do Itabirito Lixiviado

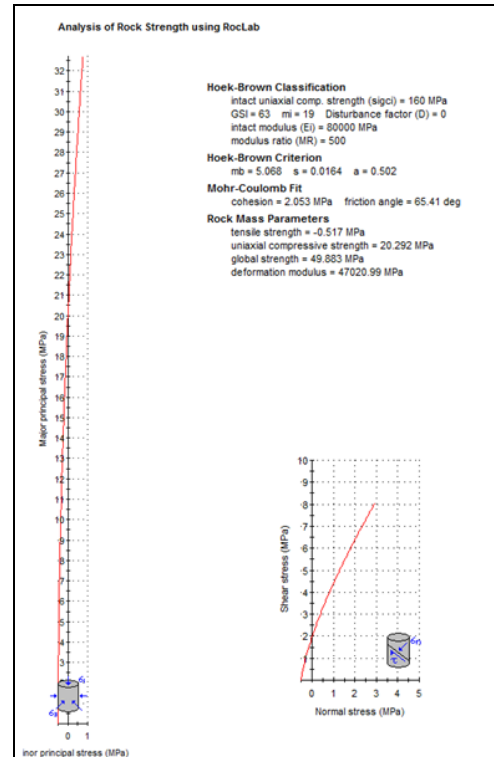
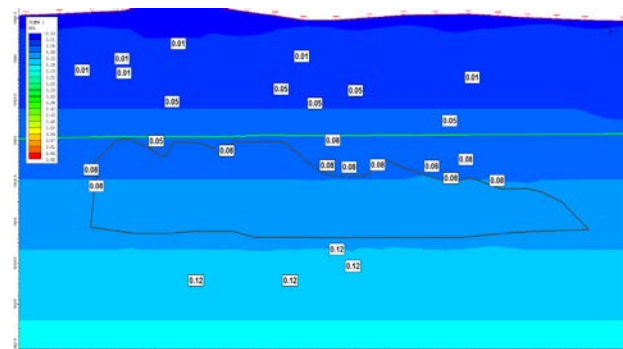


Figura 8. Índices Geotécnicos da Hematita Compacta

As figuras 9 a 11 apresentam os resultados das análises de tensão x deformação para a cavidade estudada, nas seções que apresentam as mais severas condições de solicitações esperadas.

A figura 9 mostra a redistribuição de tensões após a implantação da cavidade, verificando-se um regime de alívio de tensões no teto e piso, com concentração moderada de tensões nas laterais. Este fato confirma a expectativa de predomínio de esforços tracionais atuando no maciço rochoso circunvizinho à cavidade.



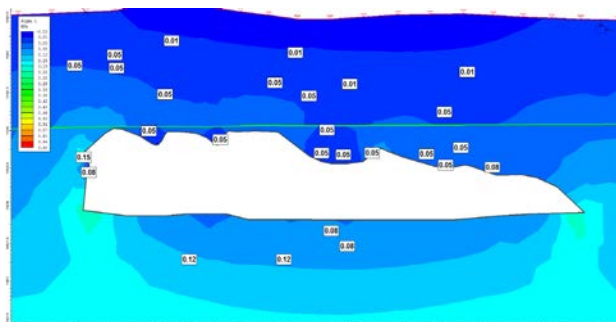


Figura 9. Distribuição das tensões antes (topo) e depois (base) da implantação da cavidade MP-07

A figura 12 mostra as deformações nas regiões de entorno da cavidade, podendo-se verificar que as deformações no teto são muito pequenas, da ordem de 3,0 mm a 6,0 mm. Os valores no piso da cavidade são muito elevados, mostrando uma tendência de soerguimento de piso, que naturalmente não se verifica na prática. Isto se explica devido aos maiores esforços tracionais nesta região.

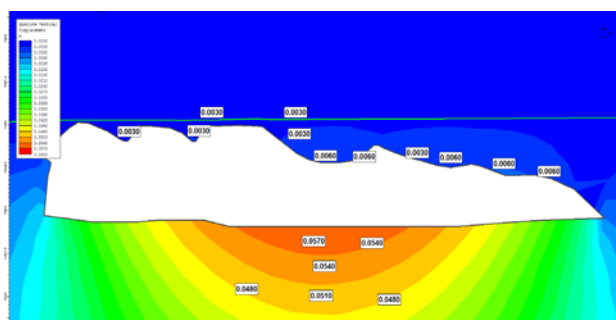


Figura 10. Valores de deformações na cavidade MP-07

Os valores encontrados para fatores de segurança mostrados na figura 13 confirmam a afirmativa anterior. Nota-se que no piso estes valores são superiores a 4,0, enquanto na região de teto da cavidade estes valores são em torno de 6,0.

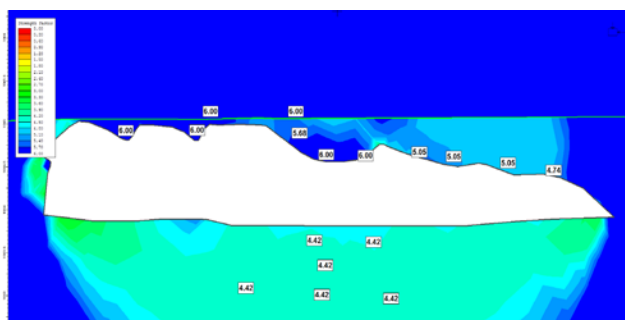


Figura 11. Valores de fator de segurança na cavidade MP-07

Os resultados das simulações para esta

cavidade confirmam a expectativa de boas condições de estabilidade definidas a partir das simulações feitas através da teoria do raio hidráulico.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos realizados permitiram avaliar as condições atuais de estabilidade da cavidade estudada, mostrando que a mesma não apresenta vãos críticos em relação à sua auto portabilidade e condições de tensão impostas neste ambiente. Os resultados obtidos indicam que as condições verificadas à época dos levantamentos de campo não apontavam para um cenário de instauração de quebras mecânicas devido ao comprometimento do maciço ou pela reativação de estruturas geológicas. No entanto, a metodologia aplicada não avalia possíveis desprendimentos pontuais de blocos localizados e comuns de ocorrência neste ambiente.

O estudo realizado mostrou que as metodologias tradicionais de estudos geomecânicos possuem aplicabilidade para estudos do comportamento geomecânico e posteriores análises de estabilidade no ambiente de cavidades em minério de ferro.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos às equipes da Coffey e da Vale que idealizaram e fizeram parte deste estudo.

REFERÊNCIAS

- Barton, N.R., Lien, R. and Lunde, J. 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mech.* 6(4), 189-239.
- Bieniawski, Z.T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications*, New York, NY, USA.
- COFFEY. (2014) *Modelo Geomecânico de Cavidades Naturais – Mina do Pico*, Relatório Técnico (RL-260713-002) – Gerência de Geotecnia, Coffey Consultoria e Serviços Ltda.
- CONAMA, Resolução 347/2004 – Publicada DOU nº 176, de 13/09/2004
- Geo&Soft International (1996-2016). *ClasRock 32 Program*.
- Laubscher D H (1990) *A Geomechanics Classification System for the Rating of Rock Mass in Mine Design*,

J1 S Afr Inst Min and Metal, Vol 90, No10, p.257-273.

Rocscience (2015) *Phase 2 Program –Versão 7.0.*

Rocscience (2004) *Roclab Program – Versão 1.0.*