

Elaboração do Modelo Geotécnico para Dimensionamento das Estruturas de Lavra do Projeto Vermelhos Sul da Mineração Caraíba S/A

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

Alexandre Magno Kalil Miranda

Mineração Caraíba S/A, Jaguarari/BA, Brasil, alexandre.kalil@minacaraiba.com

Vitor Carneiro Afonso Silva

Mineração Caraíba S/A, Jaguarari/BA, Brasil, vitor.carneiro@minacaraiba.com

RESUMO: A Mineração Caraíba S/A iniciou a exploração de cobre no município de Jaguarari/BA em 1978. A partir de 1986, a produção do minério passou a ser obtida, simultaneamente, pela operação de uma mina subterrânea, além da mina a céu aberto, até 1998, quando se esgotou a reserva desta última. Desde então, a Mineração Caraíba vem buscando novos alvos para ampliar sua produção. Dentre eles está o Projeto Vermelhos Sul, que se localiza no município de Curaçá/BA, distante 70 km da matriz da empresa. O tipo de lavra selecionada foi a subterrânea, sendo o método a ser aplicado o *Sublevel Stopping*. Em seu projeto inicial estavam previstos grandes realces verticais, com até 14 m de largura, 65 m de altura e 158 m de comprimento. Fez-se então necessária a elaboração de um modelo geotécnico para avaliar a estabilidade das estruturas de lavra (realces e pilares) pré-estabelecidas e/ou otimizá-las. Foi adotado, para a caracterização geomecânica, o sistema RMR de Bieniawski (1989), tendo sido descritos geotecnicamente 40 furos de sondagens. Dentre eles, 16 inteiramente e 24 parcialmente no minério, delimitando o espaço entre *hanging wall* e *footwall* do corpo, totalizando 7.400 m de extensão. A partir daí foi utilizado o método gráfico de estabilidade de Mathews (1981) e Potvin (1988) para o pré-dimensionamento de um realce vertical-tipo (denominado RE01), cujas dimensões fossem as máximas previstas. Obteve-se, assim, um raio hidráulico em torno de 14 e um comprimento máximo possível de 50 m, sendo necessária a utilização de cabos com 14 m de comprimento, numa malha quadrada de 1.25 x 1.25 m de espaçamento (geometria essa, definida com os ábacos propostos por Hutchinson & Diederichs (1996)). Portanto, necessitar-se-ia de um realce de comprimento reduzido se comparado ao projeto pré-definido e com uma malha de cabos bastante considerável. Entretanto, com a utilização de uma versão mais atualizada dos Ábacos de Estabilidade de Mathews, qual seja, o ábaco estendido proposto por Mawdesley *et al.* (2001) e Mawdesley (2004), verificou-se a possibilidade de se praticar um raio hidráulico máximo de 20.6 para as paredes e um comprimento estável máximo de 112.5m, sem necessidade de cabeamento. Realizou-se uma modelagem computacional 3D, do realce em questão, com o software EXAMINE-3D de elementos de contorno. Tal modelagem confirmou a viabilidade de ampliação das dimensões. Reduzindo significativamente, o número de *rib pillars* necessários, aumentando, consequentemente, a recuperação de lavra para o projeto.

PALAVRAS-CHAVE: Mineração Subterrânea; Caracterização Geomecânica; Modelagem Numérica

1 INTRODUÇÃO

O alvo Vermelhos Sul da Mineração Caraíba SA localiza-se no município de Curaçá, na região nordeste do estado da Bahia. O acesso, a partir de Petrolina/PE, pode ser realizado pela BR-407, para sul, em um percurso de 80 km até o povoado de Barrinha. Em seguida toma-se a direção leste por 45 km, pela BR-314, até o acesso à Mina Caraíba e, posteriormente, a direção norte por uma estrada não pavimentada, por cerca de 85 km (Figura 1).

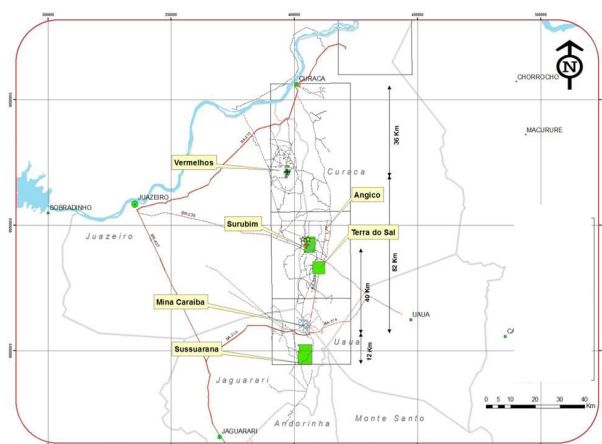


Figura 1 Mapa de localização do projeto Vermelhos Sul da Mineração Caraíba.

O método de lavra escolhido é o *Sublevel Stopping* (Figura 2), em virtude de vários aspectos, como: resistência da rocha encaixante, mergulho e potência do corpo mineralizado (geometria), possibilidade de baixa diluição e alta recuperação etc.. Para extração dos corpos horizontalizados, tal método de lavra estará associado a um posterior enchimento dos *stopes* abertos, com uma composição de rocha e matriz cimentada, correspondente à tecnologia conhecida por *Cemented Rock Fill*.

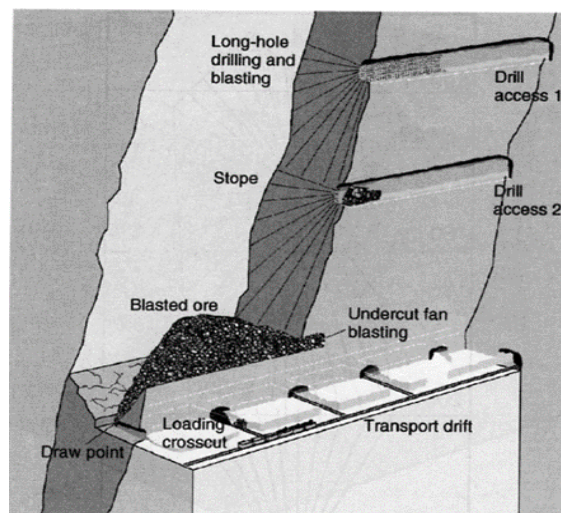


Figura 2 Ilustração esquemática do método de lavra *Sublevel Stopping* (Hustrulid & Bullock, 2001).

2 O PROJETO VERMELHOS SUL DA MINERAÇÃO CARAÍBA

2.1 Geologia Regional

O projeto Vermelhos Sul está localizado no Vale do Curaçá, situado na parte norte-nordeste do estado da Bahia, porção NE do Cráton do São Francisco (Figura 3), onde ocorrem centenas de corpos máficos/ultramáficos potencialmente portadores de sulfetos de cobre. Uma dezena de depósitos são atualmente conhecidos, destacando-se dentre eles a Mina Caraíba, com cerca de 185 milhões de toneladas de minério a 1% Cu, em média. Um desses conjuntos de corpos máficos-ultramáficos compõe a mineralização do Projeto Vermelhos, ao norte da Mina Caraíba.

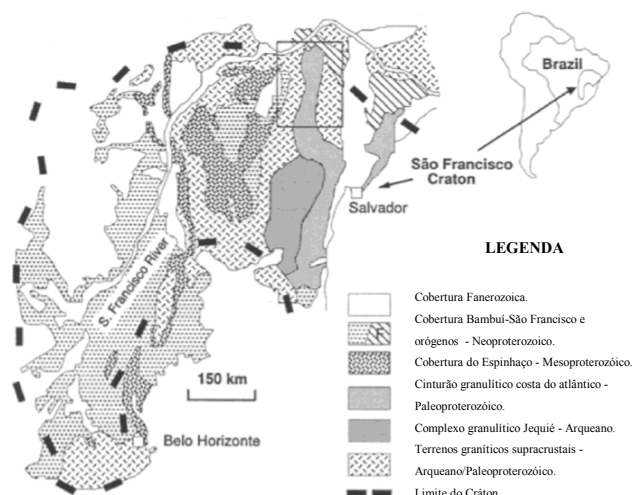


Figura 3. Localização do Cráton do São Francisco.

2.2 Projeto dos Realces

A escolha da metodologia de lavra por *Sublevel Open Stopes* (SOS) se deu, principalmente, devido à geometria do corpo mineralizado, que em alguns casos, apresenta-se verticalizado e, portanto, com condições favoráveis para a implantação desse método com adequados parâmetros de segurança. O realce denominado RE01, apresenta as maiores dimensões dentre aqueles destinados à lavra da mineralização verticalizada, podendo chegar a 14m de largura máxima, 65m de altura e 158m de comprimento.

Os corpos de minério horizontalizados, terão, por sua vez, a introdução no processo de lavra de um *Rock Fill* cimentado, para preenchimento das escavações abertas. Tais corpos localizam-se na porção central do depósito, que foi denominada de Tobogã. As dimensões desses corpos mineralizados chegam até 75m de largura, 25m de altura e 195m de comprimento. A Figura 4 ilustra o layout dos realces projetados para Vermelhos Sul.

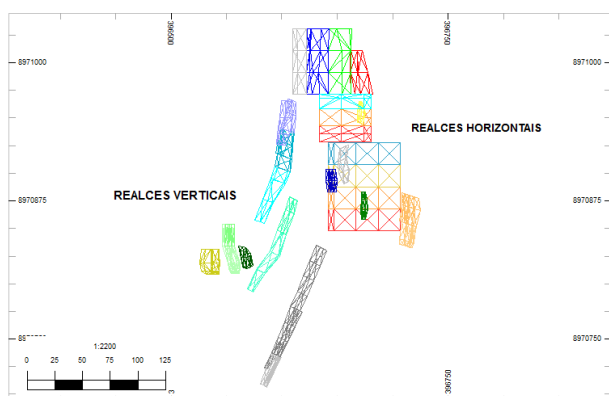


Figura 4. Visão em planta dos realces verticais e horizontais para o projeto Vermelhos Sul.

2.3 Caracterização Geotécnica do Maciço Rochoso

Tendo em vista as dimensões dos corpos mineralizados para o projeto Vermelhos Sul da Mineração Caraíba, fez-se necessária uma caracterização geotécnica, visando sistematizar o entendimento do comportamento do seu maciço rochoso perante a lavra da futura mina subterrânea. Sendo assim, foram descritos geotecnicamente 40 furos de sondagens, dentre dos quais 16 deles na sua totalidade e os 24

restantes parcialmente, delimitando o espaço entre o *hanging wall* e o *footwall* do minério, num total de 7.400m descritos.

A descrição dos testemunhos baseou-se no sistema de classificação geomecânica RMR de Bieniawski (1989), no qual fornece a qualidade do maciço rochoso, levando em consideração: a resistência à compressão uniaxial da rocha, RQD, espaçamento entre as discontinuidades, condições das discontinuidades, presença de água subterrânea e a orientação relativa entre escavações e discontinuidades. O sistema RMR foi escolhido pela sua grande aceitação internacional na área de mineração subterrânea, ser mais expedito que os congêneres, e por ser mais adaptado à classificação dos maciços com base em informações de testemunhos de sondagens, que, por ora, são a principal fonte de informação existente.

A Figura 5 apresenta um histograma com os valores de RMR encontrados para o projeto Vermelhos Sul. Conforme ali se pode observar, a maioria dos resultados indicam RMRs superiores a 60. Portanto, o maciço rochoso do alvo Vermelhos Sul é considerado de Classe II (*good rock*) de acordo com Bieniawski (1989).

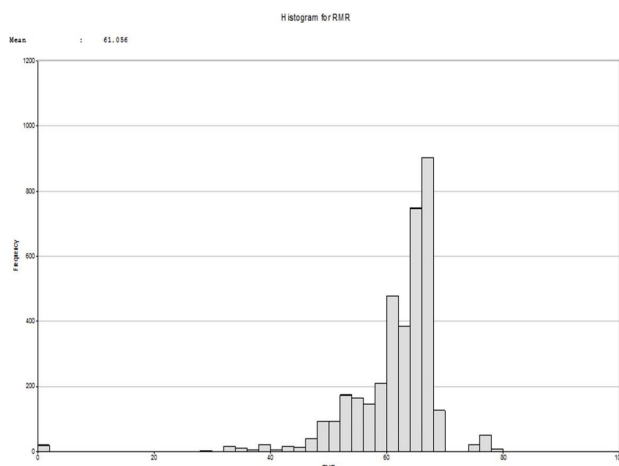


Figura 5. Histograma dos valores de RMR para Vermelhos Sul.

3 DIMENSIONAMENTO DOS REALCES E PILARES DO PROJETO VERMELHOS SUL

3.1 Realces Verticais

A caracterização geomecânica supracitada,

baseada nas informações por ora disponíveis (testemunhos de sondagens), foi utilizada para dimensionar os realces e pilares do projeto Vermelhos Sul da Mineração Caraíba. A avaliação da estabilidade geotécnica dos realces foi fundamentada no método empírico para dimensionar stopes abertos, proposto por Mathews (1981) e modificado por Potvin (1988). Os fatores levados em consideração para análise, são a classificação do maciço rochoso (em função do Q' de Barton (2013) - calculado por correlações empíricas com o RMR) e um conjunto de parâmetros empíricos, que, de acordo com Mathews-Potvin, podem influir diretamente sobre a estabilidade das faces e representam: as tensões induzidas (fator A), a orientação das estruturas geológicas (fator B) e os efeitos gravitacionais (fator C). Com todos esses fatores, calcula-se o chamado Número de Estabilidade, N' , a saber:

$$N' = Q'.A.B.C \quad (1)$$

O ábaco de Mathews-Potvin fornece um mapeamento das condições de estabilidade ou instabilidade para pares $N' \times S$ ("raio hidráulico" das faces da escavação = área / perímetro) das faces dos realces (ver, por exemplo, Figura 7).

A estratégia para se estabelecer a geometria estável dos realces verticais (por meio dos raios hidráulicos das suas faces) foi realizar a análise de um realce-tipo. Foi escolhido para tanto, de maneira conservadora, o realce que se espera ser mais crítico em termos de estabilidade, dentre todos. Com uma previsão de ter as maiores dimensões dentre todos, o realce mais crítico deverá ser aquele denominado de RE01. Em princípio, para se extrair todo o minério lavrável, o RE01 teria as seguintes dimensões (pela convenção ilustrada esquematicamente na Figura 6): uma largura (L) de 14m, altura (H) de 65m e comprimento (C) igual a 158m. Como se pode observar, entretanto, na Figura 7, tais dimensões não forneceriam paredes estáveis de acordo com o ábaco de Mathews-Potvin. As suas condições estão representadas pelo quadrado vermelho de contorno preto, que cai na área ábaco relativa à condição "Instável (colapso inevitável)". Já o teto, representado na mesma Figura 7 pelo triângulo preto, seria

estável. Para obter paredes estáveis, optou-se por redimensioná-las para uma estabilidade mediante reforço com cabos, em condições de alta confiabilidade para o projeto. Isso está representado na Figura 7 pelo ponto quadrado em cor verde, posicionado na área do ábaco correspondente tal condição. Naquela posição do gráfico de Mathews-Potvin, tem-se um raio hidráulico (S) ligeiramente acima de 14. Isso significa que o correspondente comprimento máximo possível seria igual a 50m. Para essa geometria ($L = 14\text{m}$; $H = 65\text{m}$ e $C = 50\text{m}$), dever-se-ia utilizar cabos de 14m de comprimento, numa malha quadrada com $1.25 \times 1.25\text{m}$ de espaçamento, conforme se obtém nos ábacos propostos por Hutchinson & Diederichs (1996), apresentados na Figura 8. Portanto, necessitar-se-ia de uma malha bastante considerável para se garantir a estabilidade da face com cabos. Interessante observar, que para estabilidade sem suporte com cabos, dever-se-ia praticar, de acordo com o ábaco de Mathews-Potvin (Figura 7), um $S = 10$. Para tal raio hidráulico, o máximo C alcançável seria em torno de 29m apenas.

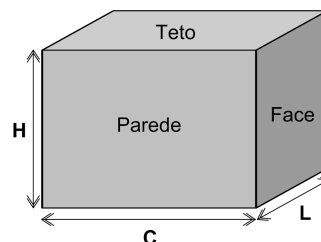


Figura 6. Convenção para denominação das dimensões de um realce qualquer: L = largura das faces e teto; C = comprimento das paredes e teto; H = altura das paredes e faces.

Tendo em vista o pequeno vão ($C = 10\text{m}$) possível sem a utilização de cabos, por um lado, e a considerável malha a ser adotada para que se obtenha um vão razoável ($C = 50\text{m}$), Figueiredo (2015), propôs redimensionar o RE01 utilizando uma versão estendida dos ábacos de estabilidade de Mathews (mais atualizada e incorporando em sua base de dados um maior número de realces de condições geomecânicas semelhantes àquelas do RE01). Trata-se do ábaco estendido apresentado por Mawdesley (2001, 2004). Por intermédio desse ábaco foi possível determinar um raio hidráulico estável

máximo para as paredes igual a 20.6. A Figura 9 mostra tal resultado, obtido com a utilização de uma *Worksheet* em MathCad, especialmente desenvolvida para tanto.

Por: João Paulo S. de Freitas										
Empresa		Mineração Caraíba S/A								
Local		Vermelhos Sul - Curaçá/BA								
Relace / Condição	Litologia	Q'	A	B	C	Realce		S	N'	Cor
Teto	Gnaiss	13.9	1.00	0.3	2	Compr	Altura	6.43	8.34	▲
Parede	Gnaiss Tonalítico	6.45	1.00	1.00	8	158	65	23.03	51.60	■

Por: João Paulo S. de Freitas										
Empresa		Mineração Caraíba S/A								
Local		Vermelhos Sul - Curaçá/BA								
Relace / Condição	Litologia	Q'	A	B	C	Realce		S	N'	Cor
Teto	Gnaiss	13.9	1.00	0.3	2	Compr	Altura	6.43	8.34	▲
Parede	Gnaiss Tonalítico	6.45	1.00	1.00	8	50	65	14.13	51.60	■

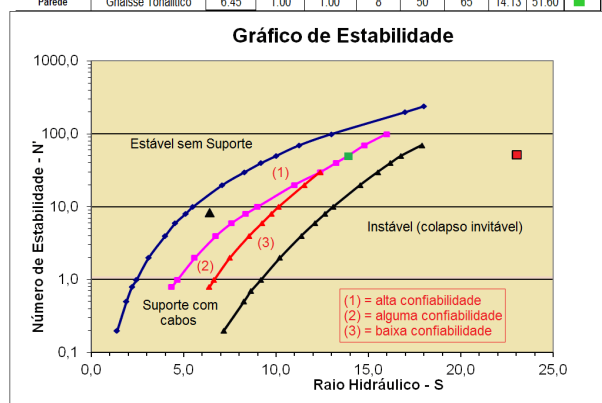


Figura 7. Análise gráfica de estabilidade do RE01(realce-tipo) pelo ábaco de Mathews-Potvin.

Considerando-se que a altura (H) do RE01 é de 65m, chega-se a um correspondente comprimento estável igual a 112.5m. Sendo assim, para se lavar a extensão total prevista, de 158m, seria requerido apenas 1 (um) *rib-pillar* intermediário, posicionado no meio do vão do realce.

Estimou-se, preliminarmente, uma espessura necessária de apenas 5m para esse *rib-pillar*. Para confirmar tal expectativa de espessura, foi realizada uma análise computacional 3D (com o software Examine3D de elementos de contorno - Figura 10). A Figura 11, por sua vez, traz os parâmetros geotécnicos adotados na análise do pilar. Tais parâmetros foram obtidos pela metodologia de Hoek-Brown (Marinos & Hoek, 2000; Hoek et al., 2002; Hoek & Diederichs, 2006), com o software RocLab. Para tanto, a qualidade do maciço do pilar deve ser expressa em termos do *GSI* de Marinos & Hoek (2000), que foi calculado a partir do *Q'* pela expressão:

$$GSI = 9 \ln Q' + 44 \quad (2)$$

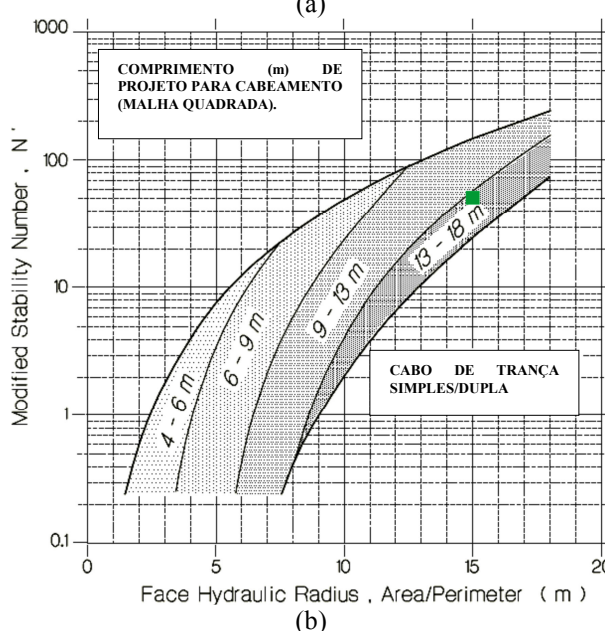
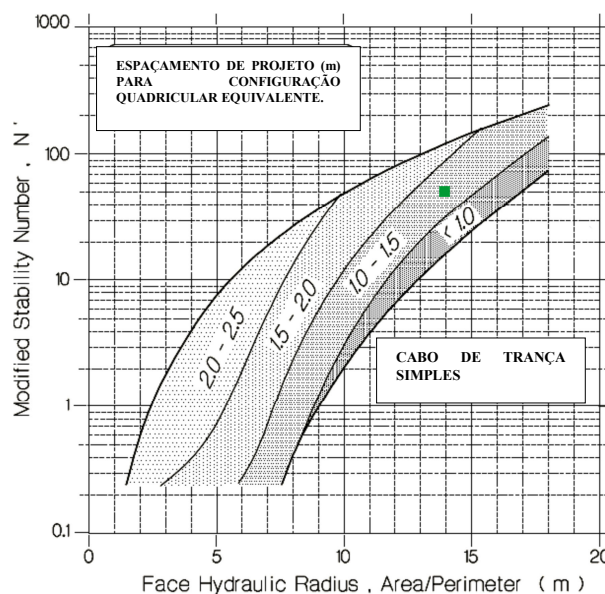


Figura 8. Malha de cabos para suporte das paredes do RE01, conforme Hutchinson & Diederichs (1996): (a) espaçamento de 1.25 x 1.25m; (b) comprimentos de 14m.

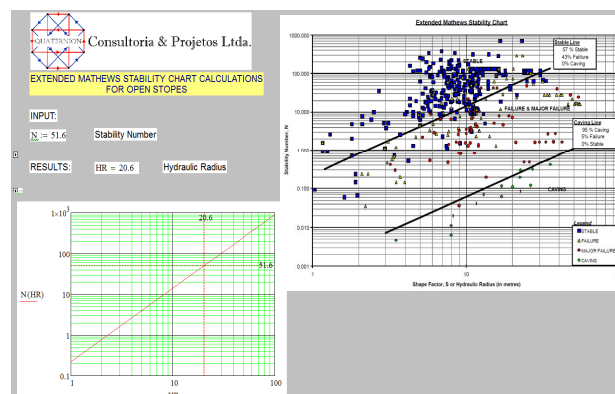


Figura 9. Resultado para o máximo raio hidráulico estável das paredes do RE01, de acordo com o ábaco estendido de estabilidade de Mawdesley (2001, 2004) -(Figueiredo, 2015).

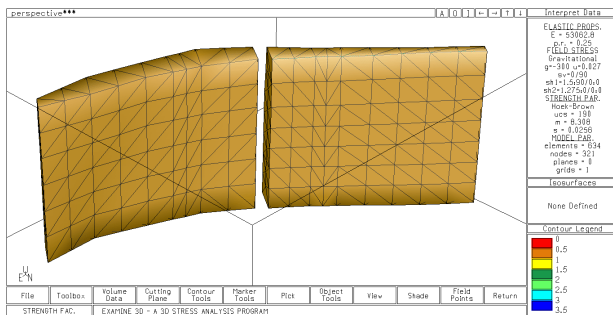


Figura 10. Modelo computacional do *rib-pillar* projetado a meio vão do RE01 - software EXAMINE-3D.

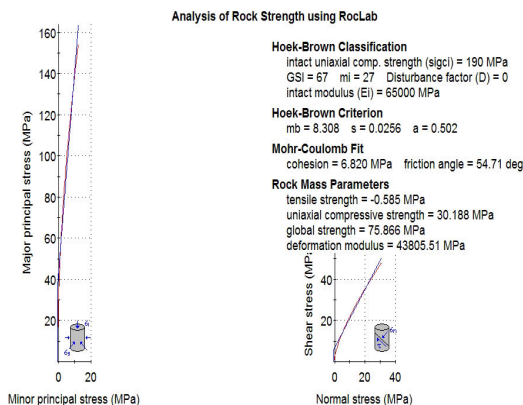
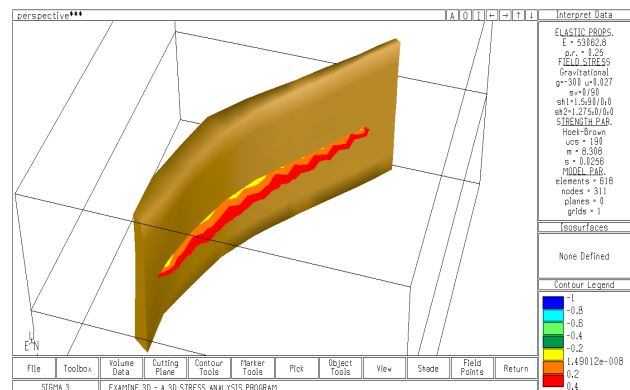


Figura 11. Parâmetros geotécnicos utilizados para análise computacional do RE01 com um *rib-pillar* intermediário - software RocLab.

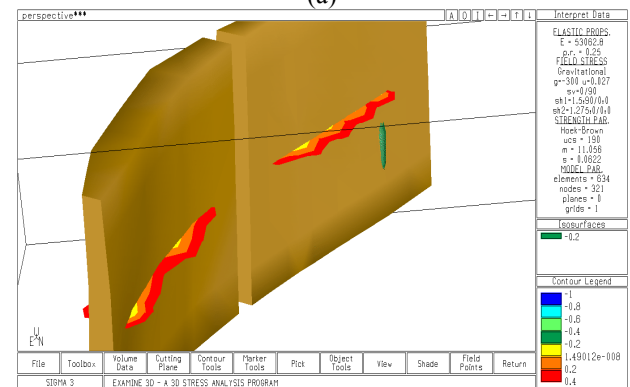
Para os demais parâmetros necessários, por ora indisponíveis, como, por exemplo, a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta e o estado de tensões *in situ*, foram considerados os mesmo valores que normalmente se adotam nas análises computacionais feitas para a mina Subterrânea da MCSA, uma vez que ali se têm condições geomecânicas bastante semelhantes às encontradas em Vermelhos Sul.

Devido à sua elevada esbeltez e, por conseguinte, à sua baixa rigidez, o *rib-pillar* em questão deverá ter um pequeno efeito como elemento estrutural resistente, isto é, para que absorva alguma parcela significativa das tensões atuantes. O seu principal papel deverá ser o de reduzir o vão (C) do realce, dividindo-o ao meio, e, assim, tornando suas paredes mais estáveis (Figueiredo, 2015). Isso deverá ocorrer e pode ser demonstrado pela redução da porção desconfiada do maciço rochoso que se situa nas paredes do realce. A observação das isofaixas (distribuição) das tensões principais mínimas (σ_3) induzidas nas paredes do realce,

com e sem o pilar, permite visualizar essa redução (Figura 12). Com o pilar (Figura 12(b)), tem-se uma extensão desconfiada do maciço (aquela que corresponde a baixos valores de σ_3 , eventualmente de tração) bem mais reduzida que a verificada sem a existência de tal pilar (Figura 12(a)).



(a)



(b)

Figura 12. Isofaixas de σ_3 no plano horizontal à meia altura do pilar. Está mostrada a extensão de baixos confinamentos nas paredes do RE01: (a) sem o *rib-pillar* central; (b) com o *rib-pillar* central.

Com o mesmo modelo computacional da Figura 12, foi possível determinar, também, os Fatores de Segurança desse pilar: pode-se considerá-los iguais ou superiores a 1.5 (Figueiredo, 2015). Sendo assim, com base nos estudos mencionados, também para os demais realces verticais do projeto Vermelhos sul, seria possível adotar um raio hidráulico estável máximo de 20.6, visto esse valor mostrou-se viável para a estabilidade do mais crítico dentre todos, que é justamente o realce-tipo RE01.

3.2 Realces Horizontais (Tobogã)

As análises iniciais para os realces horizontais, indicaram as seguintes dimensões para a lavra

(Figura 6): largura de 15m, altura de 25m e comprimento de 70m. Posteriormente, foi considerada a utilização de *Rock fill* cimentado, visando obter uma maior recuperação do minério pela completa extração dos realces secundários e eliminação de todos os *rib-pillars* eventualmente necessários. A Figura 13 indica pelo ábaco de estabilidade de Mathews-Potvin, que as paredes dos realces (quadrado de cor preta) são estáveis sem suporte, para uma lavra realizada em fase única de 70m de comprimento. Já o teto (triângulo preto) requereria, para tal comprimento, suporte com cabos. Avaliou-se, então, uma alternativa com duas fases de 35m (Figura 13 – losango preto), sendo também necessário um suporte com cabos.

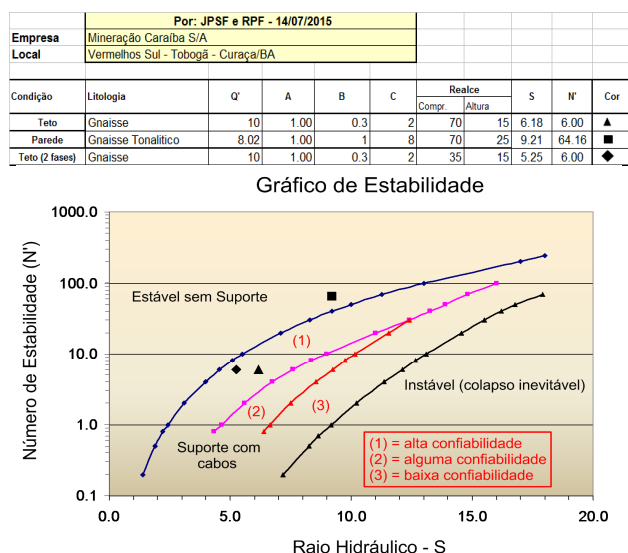


Figura 13. Análises gráficas de estabilidade do Toboã pelo ábaco de Mathews-Potvin.

Figueiredo (2015) utilizou o ábaco estendido de Mawdesley (2004) e reavaliou o máximo raio hidráulico de estabilidade do teto, concluindo que seria igual a 6.2. Isso corresponde, mantendo-se as outras dimensões iguais, a um comprimento máximo estável do teto de 71.5m (Figura 14).

Concluiu-se, assim, que seria possível, em princípio, lavar o Toboã numa única fase de 70m sem necessidade de suporte com cabos, uma vez que o máximo comprimento estável determinado com o ábaco de Mawdesley (2004) ($C_{\text{máx}} = 71.5\text{m}$) é ligeiramente superior a essa dimensão. No entanto, tal comprimento máximo é praticamente igual à extensão inicialmente

proposta para a lavra (70m). Portanto, não se teria margem de segurança alguma. Em virtude disso, do ábaco de Mawdesley (2004) se tratar de um método empírico (cuja aplicação está sempre sujeita a incertezas consideráveis) e, também, dos dados disponíveis para as análises serem ainda muito preliminares, Figueiredo (2015) considerou prudente utilizar a lavra sem suportes em duas fases de 35m. Vale salientar que a aplicação inicial do ábaco de Mathews-Potvin (Figura 13) indicou a necessidade de cabos, mesmo para duas fases. Para a alternativa de lavra em fase única de 70m, considerou-se necessário adotar uma malha de cabos para suporte do teto. Conforme indicado pelos ábacos de Hutchinson & Diederichs (1996), para um raios hidráulico de 6.2 (Figura 15), ter-se-ia: espaçamentos de 2.25 x 2.25 m e comprimentos de 7.5 m.

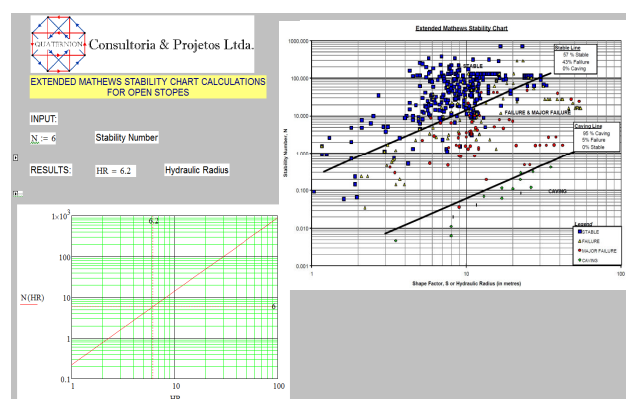
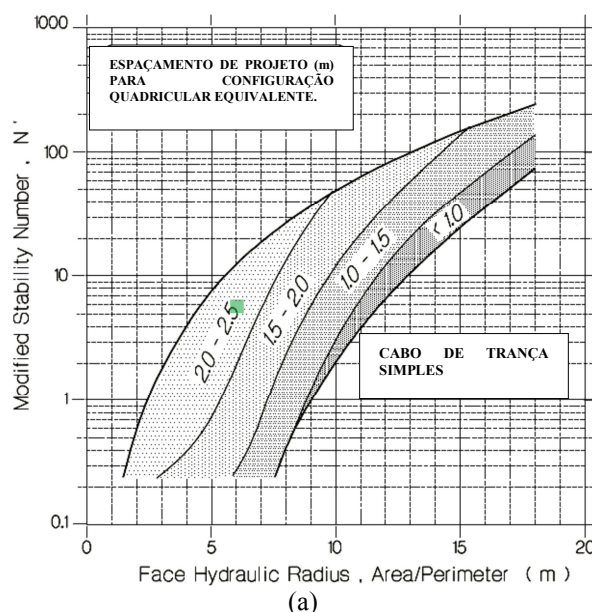


Figura 14. Resultado para o máximo raio hidráulico estável do teto do Toboã de acordo com o ábaco estendido de Mawdesley (2004).



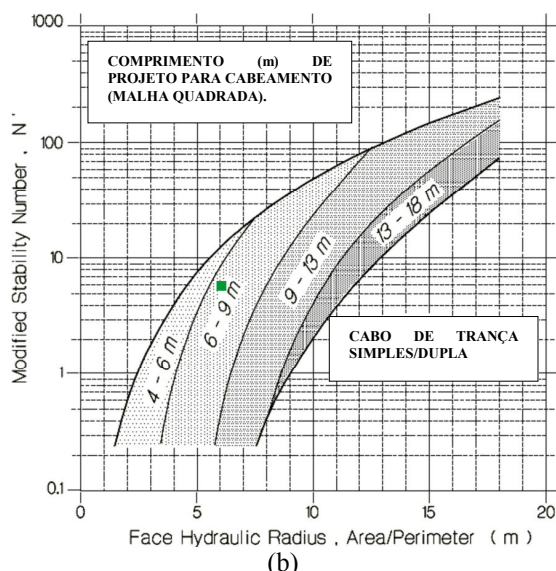


Figura 15. Malha de cabos para suporte do teto do Tobogã, conforme Hutchinson & Diederichs (1996): (a) espaçamento de 2.25 x 2.25m; (b) comprimentos de 7.5m.

4 CONCLUSÕES

Em função das análises apresentadas, pôde-se concluir, em relação aos realces verticais, que é possível adotar, com base no ábaco estendido de Mawdesley (2004), um raio hidráulico máximo de 20.6 para as paredes. Portanto, um valor bem acima do estabelecido inicialmente com o ábaco de Mathews-Potvin, o que permitirá aumentar sensivelmente a recuperação na lavra. De modo a confirmar essa possibilidade, foram realizadas análises numérica numéricas com o software EXAMINE-3D de elementos de contorno.

Para os realces horizontais (Tobogã) determinou-se, com a utilização do ábaco de Mawdesley (2004), um raio hidráulico máximo sem suporte para o teto de 6.2 (comprimento de 71.5m). Contudo, considerou-se mais prudente realizar a lavra em duas fases de 35m de comprimento, sem o suporte de cabos ou, alternativamente, numa única fase de 70m com o uso dos cabos. A decisão sobre a alternativa a ser adotada deverá ser tomada posteriormente, quando novos dados se tornarem disponíveis com o início da operação.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Mineração Caraíba S/A pela

oportunidade de desenvolvimento do estudo e pelo apoio incondicional prestado.

REFERÊNCIAS

- Barton, N. (2013). *Using Q-System - Rock Mass Classification and Support Design*. NGI, Oslo, 57 p.;
- Bieniawski, Z.T. (1989). *Engineering Rock Mass Classification*. Wiley, New York, 251p.
- Figueiredo, R. P. de (2015). *Avaliação do Modelo Geotécnico e do Dimensionamento das Estruturas de Lavra (Realces e Pilares) para o Projeto Vermelhos Sul da Mineração Caraíba SA*. Relatório Interno: MCSA, 19 p.;
- Freitas, J. P. S. de (2014). *Modelo Geotécnico*. Relatório Interno: MCSA, 13 p.;
- Hoek, E.; Carranza-Torres, C. & Corkum, B. (2002). Hoek-Brown criterion – 2002 edition. Proc. NARMS-TAC Conference, Toronto, 2002, v 1, pp 267-273;
- Hoek, E & Diederichs, M. S. (2006). *Empirical estimation of rock mass modulus*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v 43, pp 203–215.;
- Hustrulid, W. A. & Bullock, R. L. (2001). *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies*. SME, Littleton, CO.;
- Hutchinson, D. J. & M. S. Diederichs (1996). *Cablebolting in Underground Mines*. Bitech Publishers Ltd.: Richmond (CA), 406 p.;
- Marinos, P & Hoek, E. (2000). *GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation*. Proc. GeoEng2000, Melbourne;
- Mathews, K.E., Hoek, E., Wyllie, D.C. & Stewart, S.B.V. (1981). *Prediction of Stable Excavations for Mining at Depth Below 1000 Meter in Hard Rock*. CANMET Report DSS Serial No. OSQ80-00081, DSS File No. 17SQ.23440-0-9020, Ottawa: Dept. Energy, Mines and Resources, Canada, 39p.
- Mawdesley, C. et al. (2001). *Extending the Mathews stability graph for open-stope design*. Trans. Instn. Mining Metall. (Sec. A: Mining Industry), v 110, pp A27-A39;
- Mawdesley, C. (2004). *Using logistic regression to investigate and improve an empirical design method*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., v 41, n 3, paper 3A07.
- Potvin, Y. (1988). *Empirical Open Stope Design in Canada*. (Ph.D.Thesis). Department of Mining and Mineral Processing, University of British Columbia, Canada, 343p.