

UTILIZAÇÃO DE FILMAGEM DE FUROS COMO FERRAMENTA PARA DIMENSIONAMENTO DE CONTENÇÃO: ESTUDO DE CASO CAMADA MN3 DA MINA SUBTERRÂNEA URUCUM

Lucas Martins da Costa do Nascimento
Geólogo- Geotécnico - Vale, Corumbá, Brasil - lumaco19@gmail.com

Leonardo Pereira da Silva
Coord. Geotecnia - Vale, Corumbá, Brasil - leonardo.silva2@vale.com

Hélio Ribeiro Alves
Engenheiro de Minas - Vale, Corumbá, Brasil - helio.r.alves@vale.com

Everton Luis Silva
Técnico de Geotecnia - Vale, Corumbá, Brasil - everton.silva@vale.com

RESUMO:

Dentre os desafios na operação de uma mina subterrânea destaca-se a sua estabilidade geotécnica, principalmente com relação ao correto dimensionamento das contenções a serem utilizadas no teto das escavações. Apresenta-se neste trabalho, o estudo de caso realizado na Mina Subterrânea Urucum, localizada no município de Corumbá/MS, responsável pela exploração de manganês. A metodologia consistiu no imageamento dos furos de contenção de teto e na modelagem 3D da Camada 3 da mina, permitindo o correto dimensionamento dos comprimentos dos cabos *birdcage* a serem aplicados. Os resultados mostraram que a metodologia adotada foi satisfatória, uma vez que aproximadamente 84% dos furos de contenção realizados foram ancorados com cabos de 3 metros, reduzindo os custos e aumentando a produtividade da mina.

Palavras-chave: Mina Subterrânea, Dimensionamento de Contenção; Segurança e Produtividade.

ABSTRACT:

Among the main challenges in operating an underground mine its geotechnical stability stands out, especially with regard to the correct Design of the supports to be installed on the roof of the excavations. Presented in this paper, the case study carried out in the Urucum Underground Mine located in the county of Corumbá/MS, responsible for manganese exploitation. The methodology consisted in the imaging of the support roof holes and in the 3D modelling of mine layer 3, allowing the correct design of birdcage cable lengths to be applied. The results showed that the methodology adopted was satisfactory, since approximately 84% of the support holes made were anchored with 3-meters cables, ensuring operational safety and increasing mine productivity.

Keywords: Underground Mine; Support Design; Safety and Productivity.

INTRODUÇÃO

O Complexo Corumbá (Mina Urucum, Mina Santa Cruz e Porto Gregório) constitui-se o principal pólo minerário do Estado do Mato Grosso do Sul, destacando-se a Mina Urucum, ativa desde 1876 e pertencente a Vale S/A desde o ano de 2004. Em 2019, a Mina Urucum produziu aproximadamente 500 mil toneladas de manganês (Mn), cuja exploração dá-se pela lavra subterrânea, utilizando-se do método de Câmaras e Pilares. A Figura 1 mostra a localização do complexo minerário.

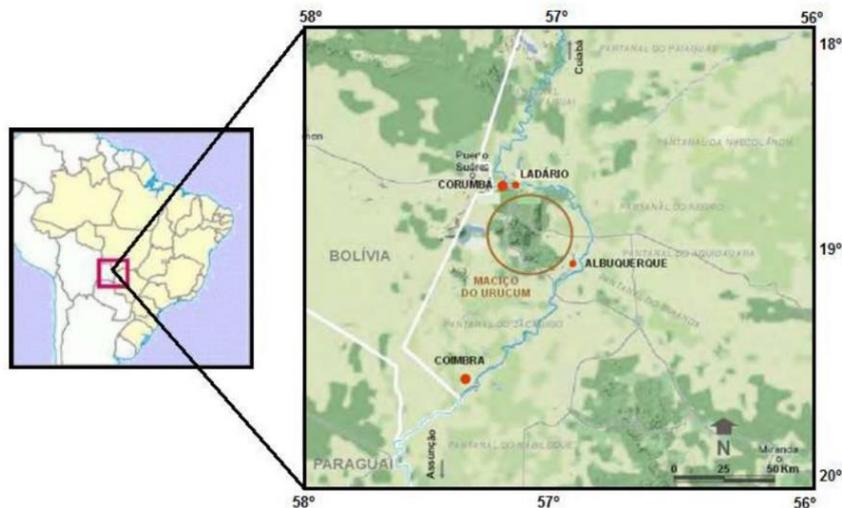


Figura 1 - Localização do Complexo minerário em Corumbá/MS.

O método de Câmaras e Pilares é caracterizado pela extração do minério por meio de aberturas horizontais ou sub-horizontais, deixando-se parte do minério para a formação dos pilares. Estes pilares apresentam formas e dimensões adequadas, limitando o vão das aberturas e promovendo a sustentação do teto. As dimensões dos pilares e das câmaras dependem principalmente das resistências das rochas encaixantes superiores, sendo de suma importância o conhecimento das condições geomecânicas do teto das escavações (LÓPEZ, 2017 [1]). O minério de manganês presente na Mina Urucum apresenta camadas sub-horizontais, com mergulho máximo de 15°, sendo explotado em duas camadas principais (MN2 e MN3), cuja distância média vertical é de aproximadamente 45 metros. A Figura 2 apresenta uma seção típica de galeria desenvolvida na Mina Urucum.



Figura 2 - Foto da geometria típica das galerias (câmaras) e pilares na Mina Urucum.

A geologia da área de estudo é caracterizada como sendo um depósito sedimentar neoproterózoico, sendo que a unidade mineralizada se situa no Grupo Jacadigo, constituído pelas Formações Taquaral, Urucum e Santa Cruz (TROMPETTE et al., 1998 [2]). A Formação Santa Cruz corresponde à unidade mineralizada, sendo formada por arcósios e conglomerados intraformacionais com cimento ferruginoso, lentes de jaspe ferruginoso, níveis de arcósios manganésiferos, hematita bandada e minério de manganês em lentes. Além disso, são encontradas em níveis superiores da formação, rochas de deposição essencialmente química, sendo frequente a presença de Jaspelito com intercalações de arcósios, jaspe e camadas de minério de manganês. As Figuras 3 e 4 apresentam detalhes do planalto residual do Morro do Urucum e projeção das camadas de MN2 e MN3, respectivamente.



Figura 3 - Planalto Residual Morro do Urucum (PRUA), visada Sul, com a Depressão do Rio Paraguai (DRP) em primeiro plano. (MACEDO, 2013 [3])



Figura 4 - Imagem da Morraria Urucum, com a projeção da camada Mn2 e Mn3.

No caso da Camada 3 (MN3), objeto do presente estudo, o teto das escavações é formado pela intercalação de camadas sedimentares, que possuem distintos valores de resistência, advindas principalmente das diferentes espessuras destes estratos e graus de alteração, constituindo-se fatores importantes para estabilidade do maciço. A figura 5 representa a sequência estratigráfica do Morro do Urucum, ilustrando essas intercalações. O conhecimento desta variabilidade presente nas intercalações sedimentares torna-se condição preponderante para definição do tipo e comprimento do reforço a ser aplicado no teto da Camada 3 (MN3).

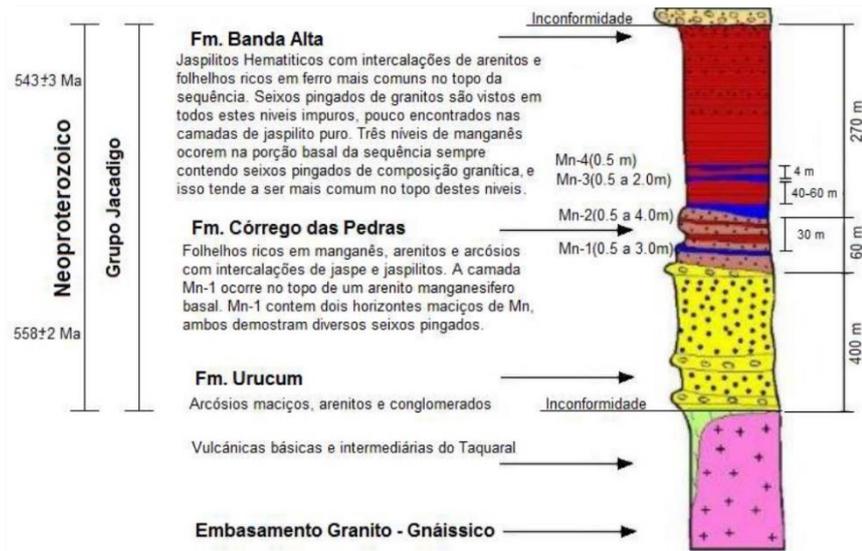


Figura 5 - Sequencia Estratigráfica Morro Urucum.

Sendo assim, o presente trabalho apresenta uma metodologia que subsidia uma análise preditiva para instalação de contenção adequada para o teto para situação atual e próximos avanços.

OBJETIVOS

Demonstrar o uso do imageamento de furos (furos de rotopercussão) como ferramenta auxiliadora para o correto dimensionamento de contenção aplicado nas áreas planejadas para desenvolvimento da camada 3 (MN3) da Mina Urucum.

METODOLOGIA

A metodologia para a execução deste trabalho consistiu primeiramente na pesquisa bibliográfica a fim de se obter informações de relatórios realizados anteriormente na Mina Urucum e análise de metodologias aplicadas em minas subterrâneas que utilizam método de lavra câmaras e pilares, com foco em maciços sedimentares estratificados. Destaca-se trabalhos publicados voltados a contenção em minas de carvão e demais trabalhos consagrados que objetivaram o estudo de dimensionamento de pilares e fatores de segurança para rochas duras. Em seguida, definiu-se a área da mina que seria objeto de estudo, para que então, pudessem ser realizados os furos para contenção e o imageamento destes. Os resultados obtidos com o imageamento foram interpretados e serviram como *inputs* para o modelo 3D da camada 3 (MN3), conforme representado na Figura 6.

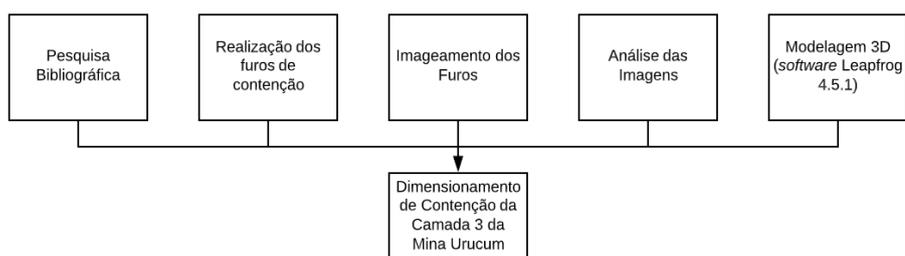


Figura 6 - Fluxograma representativo das etapas de pesquisa

Realização e Imageamento dos Furos de Contenção

Os furos rotopercussivos de contenção foram feitos no centro das galerias a 90° do plano principal da Camada MN3. Importante ressaltar que se trata de um aproveitamento das informações, uma vez que estes furos já seriam realizados para contenção conforme procedimento padrão adotado na mina. Deste modo, realizou-se primeiramente furo de 5 metros de profundidade no centro da galeria. Com base no imageamento utilizando a câmera *Hole Cam*, e na análise da descrição do furo realizado, dimensionaram-se os demais furos no entorno até os próximos cruzamentos para contenção; e ao todo foram realizados 58 furos nos cruzamentos das galerias (Figura 7). Posteriormente, foi realizado teste de arranque no suporte instalado, validando a efetividade da contenção.

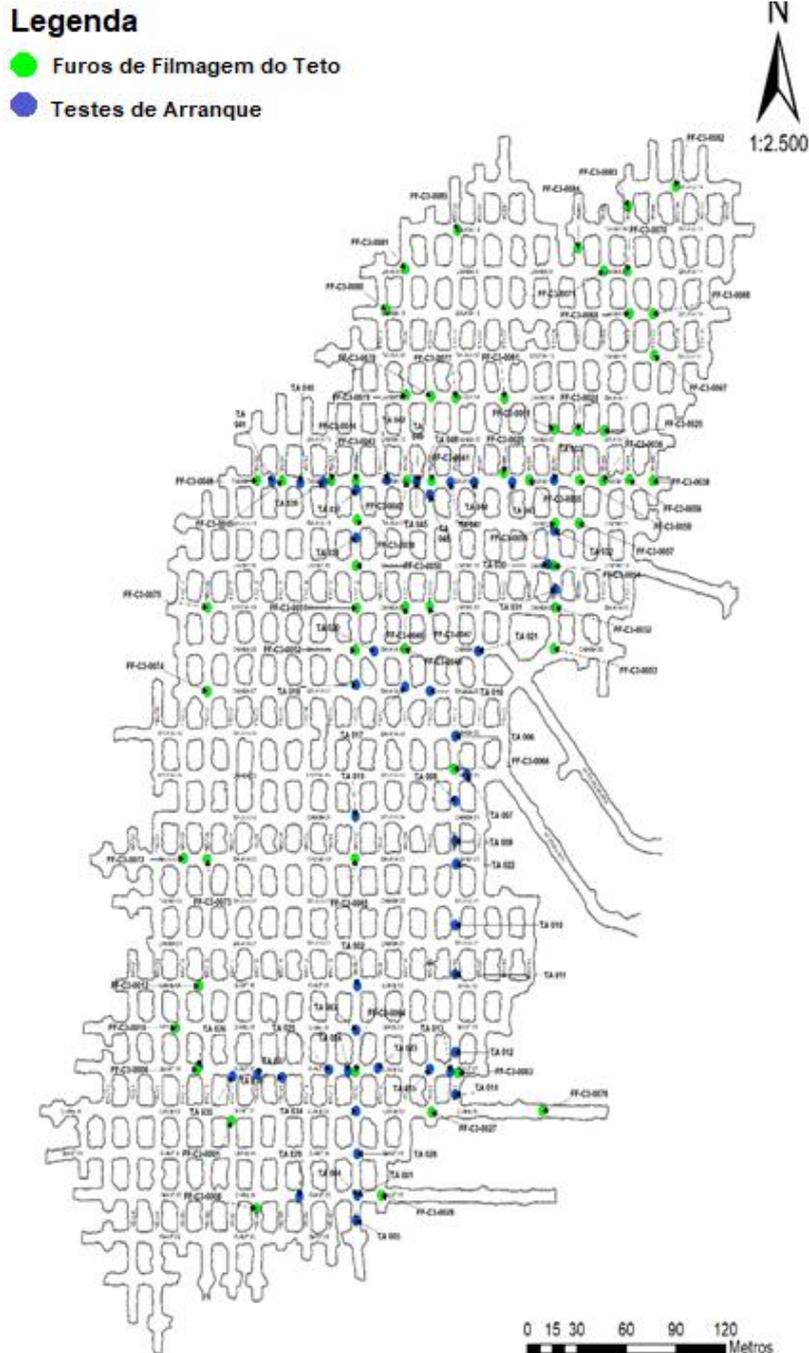


Figura 7 - Locais dos furos de filmagens e teste de arranque para validação da contenção instalada.



Figura 8 - Atividade de filmagem dos furos de 5 metros utilizando câmera *Hole Cam*.



Figura 9 - Detalhe da imagem gerada conforme a introdução da câmera dentro do furo.

Análise e Modelagem

De posse das imagens obtidas, estas foram analisadas a fim de se obter conhecimento prévio das litologias presentes, sua espessura e grau de alteração, fatores determinantes para que a sustentação e ancoragem do teto da mina fossem realizadas de maneira eficiente. Essas informações serviram como *inputs* ao *software Leapfrog 4.5.1*, utilizado para a modelagem da Camada 3 da Mina Urucum. Partindo-se do princípio que as

contenções utilizadas seriam cabos *birdcage* de comprimento igual a 3 ou 5 metros, foi possível dimensionar corretamente o comprimento do cabo a ser utilizado, evitando-se gastos desnecessários e provendo segurança operacional, visto que o comprimento dos cabos objetivou penetrar rocha estável (Hutchinson e Diederichs, 1996 [4]). De forma empírica e observacional, tem-se que os testes realizados na mina comprovaram que 1 metro de ancoragem (extensão de encaixe ativa) em rocha sã, é o suficiente para assegurar a estabilidade da ancoragem, visto que este valor de metragem garante o não rompimento nas interfaces do sistema de ancoragem (cabo, nata e rocha), sendo assim, e para critério de dimensionamento trabalhou-se com esse valor de capacidade no dimensionamento da contenção a ser instalada ancorando uma laje mínima de 1 metro.

DISCUSSÕES DE RESULTADOS

Litoestratigrafia de Teto da camada MN3

Ao longo da atividade da Mina Urucum vários trabalhos técnicos foram desenvolvidos por diversas consultorias com objetivos voltados a estudos de layout de mina, mapeamento e dimensionamento de pilares, sequenciamento de lavra, dentre outros. Dentre estes trabalhos, destaca-se o realizado por GOLDER (2006 [5]), que constitui o primeiro relatório técnico que aborda a estratigrafia do teto, descrevendo com base em sondagens, cinco seções litológicas representativas. Tais variações nas litologias e respectivas espessuras se dá em virtude de componentes estruturais e localização dentro do contexto da bacia sedimentar formacional do depósito. Estas seções encontram-se presentes na Figura 10 e ainda são utilizadas para definições e ajustes no sistema de suporte utilizados na mina (Figura 11).

Integrando os relatórios técnicos prévios com os resultados obtidos com o imageamento dos furos de rotopercussão, estes mostram-se condizentes com as seções tipo anteriormente citadas. Têm-se por definição que a melhor possibilidade de ancoragem é na rocha mais competente e resistente, sendo esta o Jaspelito e, o pior, no Arcósio alterado.

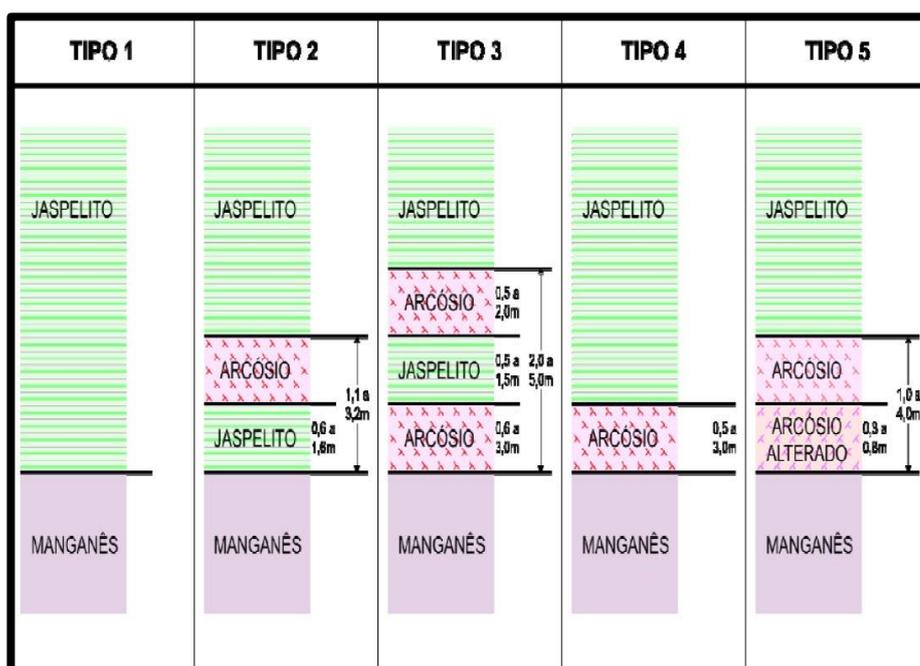


Figura 10 - Seções litológicas do teto da Mina Urucum (GOLDER, 2006 [5])

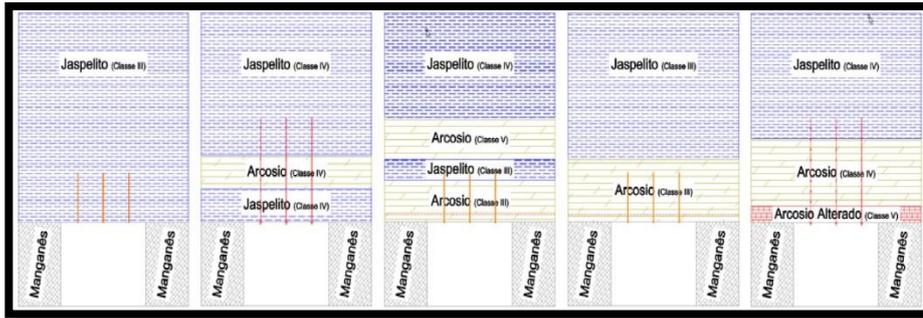


Figura 11 - Sistema de suporte indicado conforme litoestratigrafia do teto.

Em locais na mina nas quais as seções (largura x altura) são maiores para outras finalidades, como a alocação de estruturas (ponto de carga, subestações, *sumps*, oficina mecânica), é possível verificar nas paredes (Figuras 12 e 13), a litoestratigrafia verificada nas sondagens e facilmente associada as imagens dos furos, essa se constitui uma análise mais realista do maciço, visto que não se insere aqui, o dano provocado pela perfuração rotopercussiva.

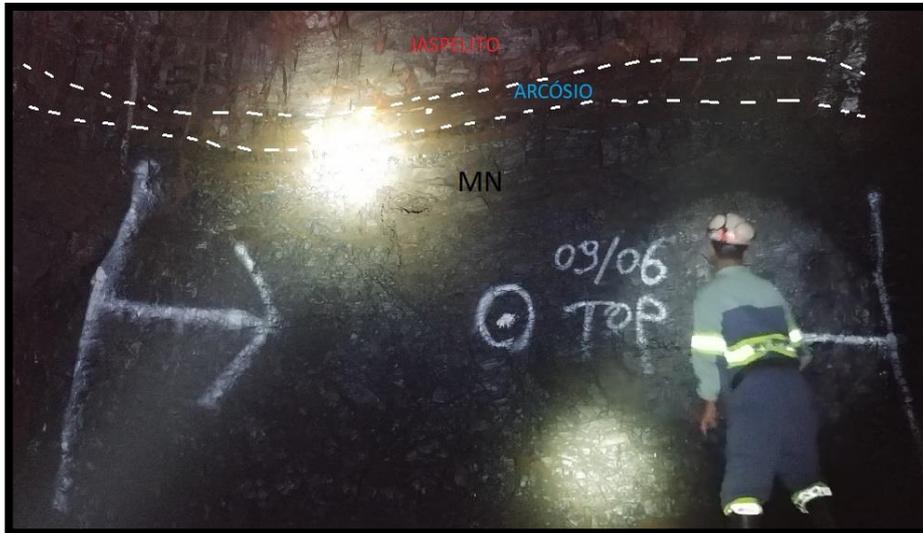


Figura 12 - Seção escavada representativa demonstrando as diferenças litoestratigráficas no teto da galeria (Camada de Óxido de Mn maciço, MnO_2).

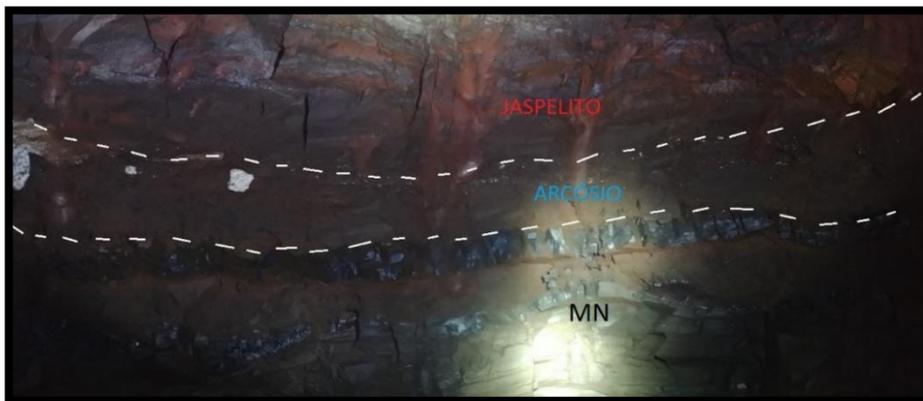


Figura 13 - Detalhe dos contatos entre os estratos no teto da galeria (Camada de Óxido de Mn maciço, MnO_2).

Importante citar a caracterização das litoestratigrafias do teto da mina identificada na camada 3 (MN3), o que remete a sua susceptibilidade a alteração e associam-se a resistência do maciço, fator este fundamental para o dimensionamento da ancoragem. O Jaspelito (Figura 14-A) é composto por intercalação de níveis de hematita com níveis de sílica ou argilominerais. Observa-se níveis (centimétricos) de Jaspelito alterado, estes, são caracterizados pela maior quantidade de argilominerais e mudança na coloração (esbranquiçada a amarelada), o que minora sua resistência e diminui a eficiência do processo de ancoragem.

O arcósio (Figura 14-B), por vezes também definido como “arenito arcoseano” é constituído essencialmente de quartzo, feldspato e argilominerais com matriz argilo ferruginosa. Observa-se a presença de seixos pingados de granitóides (*dropstones*) distribuídos de forma errática pela camada. Pela sua caracterização mineralógica, infere-se que a camada de arcósio é mais susceptível a alteração, isto é identificado nos furos de filmagens as quais observa-se, principalmente em níveis centimétricos, finas camadas de granulometria fina (até argilosa) tal é o grau de solubilização dos minerais imersos na matriz. Observa-se também, com menor frequência, mas também citado em relatórios técnicos e descrições de sondagens, camadas métricas de arcósio com aspecto maciço e pouco alterado. No que tange a condições de ancoragem, o arcósio alterado é a pior condição para sustentação, visto sua baixa resistência e susceptibilidade a alteração. Por isso, quando identificado e descrito, recomenda-se comprimento de ancoragem que o ultrapasse de forma a ancorar, pelo menos 1 metro, em rocha com maior resistência.

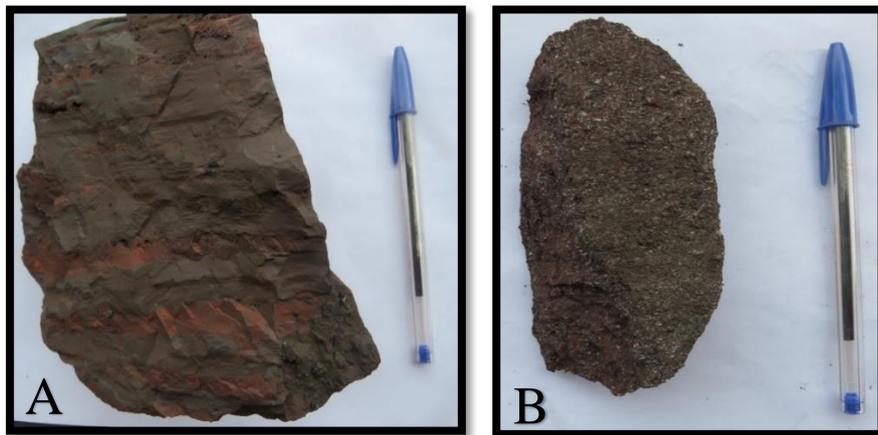


Figura 14 - Amostras do Japelito e Arcósio. A) Japelito e com bandas de hematita e sílica. B) Arcósio com feldspato, quartzo e argilominerais

Análise das Filmagens

Conforme pode ser observado abaixo na Figura 15, têm-se que o Furo (FF-C3-0026) apresenta o Jaspelito no intervalo (2,62m – 5,10m) de profundidade. Adotando-se que, para melhor eficiência da sustentação em camadas com potencial de desarticulação, é necessário ancoragem em pelo menos 1 metro de rocha competente (Jaspelito), a contenção necessária neste furo será o cabo *birdcage* de 5 metros de comprimento, que traspassará o arcósio em sua totalidade, ancorando seguramente no jaspelito com maior resistência. Caso fosse adotado o cabo *birdcage* de 3 metros, a metragem de ancoragem no Jaspelito seria somente de 0,48m, quando o ideal é 1 metro de ancoragem em rocha sã para atingir carga nominal da contenção instalada.

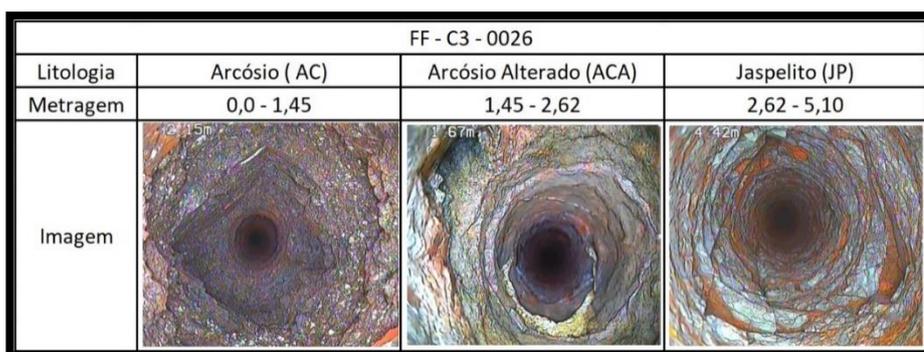


Figura 15 - Exemplo de descrição de filmagem de furos e litologias descritas.

Os demais resultados mostram que 84,49% dos 58 furos de filmagem corroboraram para a contenção com cabos de 3 metros, visto que pela filmagem e seções 3D (Figuras 16, 17 e 18), o suporte com 3 metros de comprimento, estará seguramente ancorado em 1 metro de Jaspelito. Em 15,51% dos furos de filmagens, especificados na Tabela 1, a equipe promoveu ajuste na contenção com objetivo de aumentar o comprimento do suporte instalado, visto que a instalação de contenção de 3 metros não seria suficiente para ancorar 1 metro em rocha competente, sendo necessário aumentar o comprimento da contenção de forma a garantir ancoragem segura.

Tabela 1 - Furos de Filmagens e Ajustes Realizados na Contenção prévia de 3 metros.

FURO DE FILMAGEM	METRAGEM ANCORADA EM ROCHA COMPETENTE (JASPELITO)	AJUSTE REALIZADO NA CONTENÇÃO
FF-C3-0001	0,30m	Aumento de comprimento de cabos para 5m
FF-C3-0008	0,52m	Aumento de comprimento de cabos para 5m
FF-C3-0026	0,48m	Aumento de comprimento de cabos para 5m
FF-C3-0049	0m	Aumento de comprimento de cabos para 5m, ultrapassando plano de arcósio e ancorando 1 metro em rocha competente (jaspelito)
FF-C3-0050	0,60m	Aumento de comprimento de cabos para 5m
FF-C3-0052	0m	Aumento de comprimento de cabos para 5m, ultrapassando plano de arcósio e ancorando 1 metro em rocha competente (jaspelito)
FF-C3-0054	0m	Aumento de comprimento de cabos para 5m, ultrapassando plano de arcósio e ancorando 1 metro em rocha competente (jaspelito)
FF-C3-0063	0m	Aumento de comprimento de cabos para 5m, ultrapassando plano de arcósio e ancorando 1 metro em rocha competente (jaspelito)
FF-C3-0064	0,20	Aumento de comprimento de cabos para 5m

Modelo 3D com dados de filmagens

Para melhor visualização da continuidade das litologias no teto da camada MN3, utilizou-se o software *Leapfrog 3D* de modelagem implícita. Os furos de filmagens foram descritos e compõem um banco de dados similar ao de furos de sondagens, assim, fez-se o modelo 3D que é automaticamente atualizado conforme vão sendo obtidas novas informações de filmagens.

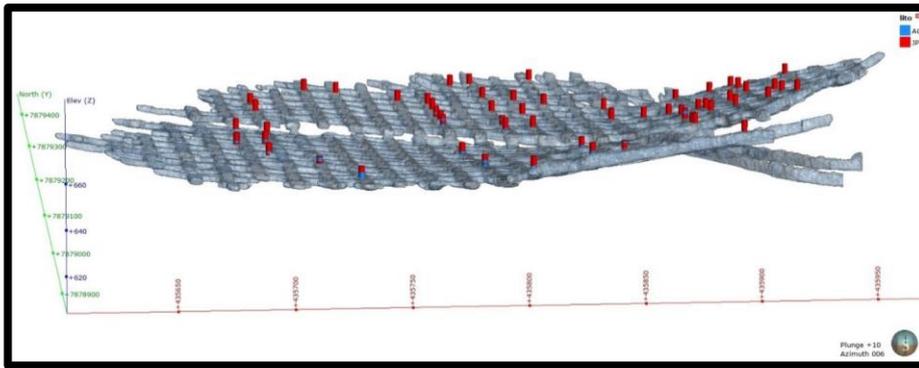


Figura 16 - Imagem Camada 3 e disposição dos furos de filmagens de teto.

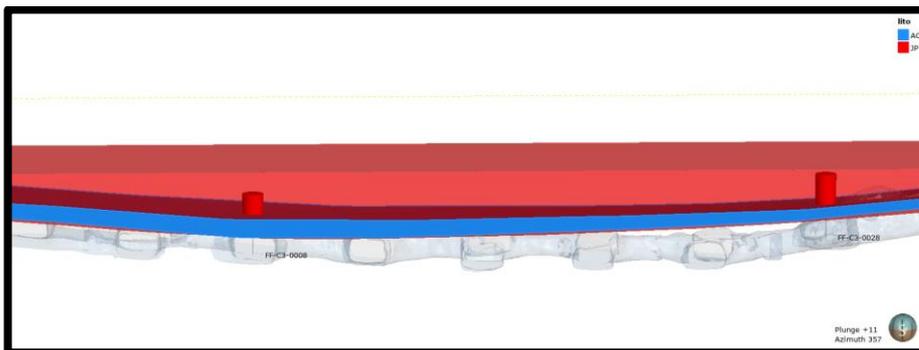


Figura 17 - Seção (FF-C3– 0008; FF-C3-00028), camada arcósio (inferior) e jaspelito (superior).

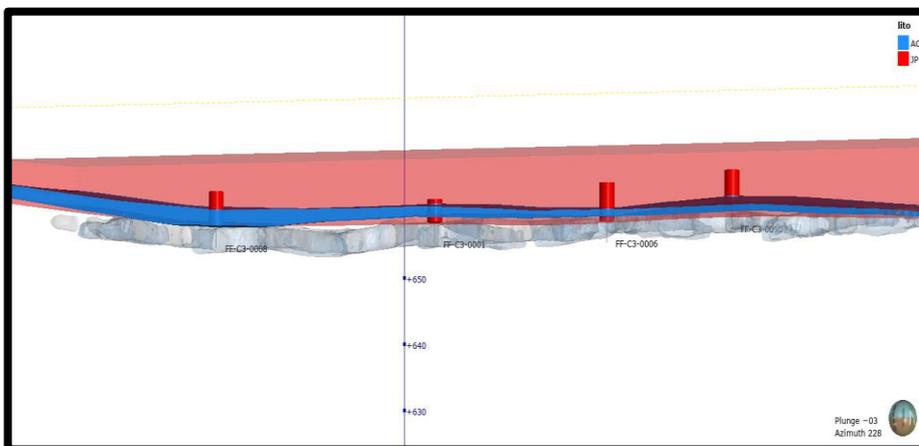


Figura 18 - Seção (FF–C3–0008; FF–C3-0001; FF-C3-0010; FF–C3-0006), detalhe camada de arcósio intercalada com jaspelito.

Testes de Arranque e Validação da Ancoragem instalada

Os testes de arranque atingiram percentual de 100% de satisfação, dos 37 cabos testados, todos atingiram valor esperado. Os testes realizados atingiram a carga até de 21 ton, abaixo do limite nominal dos cabos *birdcage* (26 ton), porém, a carga menor utilizada visou preservar a contenção já instalada.



Figura 19 - Equipamento de teste de arranque e marcação em campo após teste realizado.



Figura 20 - Malha de contenção adotada na camada MN3 e no detalhe conjunto da instalação chapa/clavete.

Custos e Produtividade

Com a adoção da metodologia, tem-se uma economia substancial de custos e aumento da produtividade. Estima-se que se a proporção da metodologia adotada para cabos de 3m e 5m são da ordem de 85% e 15% respectivamente, conforme constatado no presente trabalho, tem-se 3 parâmetros de produtividade a serem considerados:

Metragem perfurada

Com a metodologia adotada, prevê-se a economia de 538 metros de perfuração/mês, ou seja, 6.456 metros de perfuração/ano. O que representa, aproximadamente, economia de 50 bits de perfuração por ano, além de ferramentais de desgaste, horas de manutenção, horas homem trabalhadas, energia, entre outros. Além disso, economiza-se com cabos e cimento de preenchimento dos furos, o que representa anualmente uma economia de 77.400 Kg de cimento, o que somando às demais economias, representa valor considerável.

Horas de Trabalho

Os furos de 3 metros e 5 metros gastam, respectivamente, entre 5 e 12 minutos para serem concluídos, isto se deve em decorrência da troca de hastes. Sendo assim a metodologia adotada prevê economia de 31 horas/mês, ou seja, 372 horas/ano na atividade de perfuração. O aumento dessa disponibilidade pode ser alocado para outras frentes de trabalho ou em outras atividades.

Ritmo de desenvolvimento

Tendo em vista, que, agilizando o processo de contenção, disponibiliza-se as frentes para a continuidade do ciclo operacional. Entende-se que com a metodologia adotada e mantendo a capacidade produtiva atual de perfuração (1680 metros/mês) para contenção de teto, tem-se um acréscimo de 179 cabos a mais instalados por mês, sendo a malha de contenção 1,5 m x 1,5 m, tem-se aproximadamente a liberação de 970 metros/ano a mais para o desenvolvimento produtivo.

CONCLUSÃO

Os resultados demonstram que com a utilização das filmagens de furos nos cruzamentos das galerias da Camada 3 (MN3) tem-se aplicação de contenção assertiva, com dimensionamento correto do comprimento do suporte, promovendo ancoragem em rocha competente.

Essa metodologia demonstrou-se relevante, primeiramente, por garantir segurança operacional das atividades na mina subterrânea, o que foi comprovado pelos resultados favoráveis dos testes de arranque realizados e, principalmente pela não ocorrência de deslocamentos e/ou instabilidades nos tetos nas áreas produtivas e de tráfego de pessoas/equipamentos.

Conclui-se também que os ganhos com a metodologia adotada são significativos tanto para o planejamento e dimensionamento das atividades do ciclo da mina, quanto no que tange a economia de custos, nesse caso, a produtividade e melhor alocação de recursos.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Gerência Executiva Operações Centro-Oeste.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LÓPEZ, M. I. M. (2017). Modelação numérica para o dimensionamento de pilares de minas subterrâneas. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. Ouro Preto.
- [2] TROMPETTE, R.; DE ALVARENGA, C. J. S. e WALDE, D. (1998). Geological evolution of the Neoproterozoic Corumbá graben system (Brazil). Depositional context of the stratified Fe and Mn ores of the Jacadigo Group. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 11, n. 6, p. 587–597
- [3] MACEDO, H.A.(2013). Geomorfologia e Hidrossedimentologia da planície do rio Paraguai, da lagoa vermelha a confluência do rio Miranda, Pantanal mato-grossense.[s.1]UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA.
- [4] HUTCHINSON, D.J.; DIEDERICHS, M.S. (1996) Cablebolting in Underground Mines. Richmond: Bitech Publishers Ltd, p. 44.
- [5] GOLDBER ASSOCIATES BRASIL. (2006) Modelo geomecânico preliminar para a Mina de Manganês do Morro do Urucum. Relatório. Belo Horizonte.

