

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Atualização do Modelo Estrutural 3D da Mineração Caraíba e a Relação com os Projetos de Longo e Curto Prazo

Daniel Santos de Santana

Engenheiro Geotécnico Pleno, Mineração Caraíba, Jaguarari, Brasil, daniel.santana@minacaraiba.com

João Guilherme Travassos Rios Tomé

Gerente de Planejamento e Lavra, Mineração Caraíba, Jaguarari, Brasil, joao.guilherme@minacaraiba.com

RESUMO: A mina subterrânea Pilar, pertencente à Mineração Caraíba, atualmente a 1500m de profundidade, apresenta um contexto geológico de existência de zonas de falhas persistentes que interceptam galerias e projetos de lavra desde a superfície. A necessidade de se entender o comportamento dessas estruturas requer a construção de um modelo geotécnico estrutural 3D. Para tal, a metodologia de descrição geotécnica via critério de classificação RMR foi conduzida para caracterizar o maciço rochoso; seções geotécnicas foram desenhadas em software de Planejamento de Mina visando delimitar a zona de falha através da construção de um *wireframe*, possibilitando assim uma previsão de interceptação da zona de falha com as escavações. A interpretação dessa estrutura possibilitou gerar proposições de *design* de mina, definição de suporte, sugestões de método de abertura das galerias, avaliação de risco geotécnico, investigação da sequência de lavra, recomendações de enchimento dos realces e associação com a expansão do sistema de microssísmica da mina.

PALAVRAS-CHAVE: Modelo Estrutural 3D, Zona de Falha, Previsibilidade, *Design* de mina, Mineração Caraíba.

ABSTRACT: Pilar underground mine, owned by Mineração Caraíba, currently at a depth of 1500m, shows a geological context of persistent fault zones that intersect galleries and mining projects from the surface. To understand the behavior of these structures, it is required to build a 3D structural geotechnical model. Therefore, a geotechnical core logging based on RMR method has been conducted to characterize the rock mass. Geotechnical sections were designed in Mine Planning software in order to delimit the fault zone through the construction of a *wireframe*, thus enabling a prediction of fault zone interception with excavations. The structure interpretation made it possible to generate proposals for mine design, definition of rock mass support, suggestions for the method of opening the galleries, geotechnical risk assessment, mining sequence investigation, recommendations for stope filling and association with the mine's seismic expansion system.

KEYWORDS: 3D Structural Model, Fault Zone, Predictability, Mine Design, Caraíba Mine.

1 Introdução

A previsibilidade do comportamento do maciço rochoso frente à abertura de novos projetos de mineração é de suma importância no *design* e melhor alocação das escavações, dimensionamento de suporte e análise de risco geotécnica. O desenvolvimento de um modelo estrutural é o primeiro estágio de construção de um modelo geotécnico numa mina subterrânea. O valor obtido a partir de uma avaliação geotécnica prévia de projetos da mina tem sido descrito através da necessidade de se estabelecer um nível apropriado de risco geotécnico à cada estágio de evolução do planejamento de mina das escavações (Hanson et al, 2005). Além disso, um modelo geotécnico pode ser útil para prover otimizações e previsibilidade ao plano de produção na aplicação do conceito “*mine to mill*” (Bye, 2006).

A Mina Pilar, pertencente à Mineração Caraíba, situada na região norte-nordeste da Bahia, encontra-se numa sequência de rochas máficas / ultra-máficas composta de noritos, gabro-noritos e piroxenitos encaixada basicamente em gnaisses e migmatitos, correspondendo uma faixa de terreno Pré-Cambriano do Vale do Rio Curaçá, na porção nordeste do Cráton São Francisco (Geologia de Longo Prazo da MCSA, 2013).

A mina subterrânea atualmente encontra-se a 1500m de profundidade e apresenta um contexto geológico - geotécnico de existência de zonas de falhas persistentes que interceptam galerias e projetos de lavra. A construção de um modelo geotécnico 3D faz-se necessária a fim de prover um entendimento e interpretação



da influência dessas estruturas no ciclo de abertura de novas escavações. O desenvolvimento do modelo geotécnico se iniciou no ano de 2015, com recorrentes atualizações entre os anos de 2019 a 2021, à medida que os critérios técnicos conceituais de projeto de engenharia foram amadurecendo na Mineração Caraíba. Este trabalho tem como propósito demonstrar a metodologia utilizada na atualização do modelo estrutural tridimensional e explicar quais as influências que a interpretação do comportamento do maciço rochoso inerente ao contexto estrutural da mina Pilar tem sido capaz de trazer como proposições ao *design* de mina, principalmente na definição de rampas e galerias permanentes, previsibilidade ao plano de produção e avaliação de riscos geotécnicos.

2 Objetivos

Apresentar de maneira clara e objetiva a metodologia utilizada para composição do modelo geotécnico estrutural das falhas principais da mina subterrânea Pilar; divulgar à comunidade geotécnica as principais características e comportamentos observados nesse ambiente geotécnico; demonstrar as orientações geotécnicas contributivas para o desenvolvimento de escavações em zonas de falha; reforçar a importância da caracterização geotécnica para a avaliação prévia de projetos de escavações; apresentar as contribuições da interpretação do modelo estrutural para o planejamento de mina.

3 Metodologia

A metodologia empregada para a atualização do modelo estrutural tridimensional é baseada na mesma descrita por Freitas, 2016, onde se tem a descrição geotécnica dos furos de sondagem como *input* inicial para a construção do modelo.

A atualização do modelo geotécnico estrutural ocorreu entre os anos de 2019 a 2021, dividindo-se em três etapas: a primeira correspondeu à interpretação da campanha de furos de sondagem em 2019, que se estendeu abaixo da cota -1039m até a cota -1366m, visando atender ao projeto de aprofundamento da mina; em 2020 por sua vez, a interpretação geotécnica de furos de sondagem avaliou campanhas antigas que partiu da cota -345m até a cota +425m, correlacionado aos projetos PIPII e R22, objetivando atender a interpretação da zona de falha para os projetos de construção de escavações de infraestrutura permanentes, como o *shaft*, *raises* e novas rampas; já em 2021 foi realizada a extensão da falha principal para Sul, no intuito de associar aos projetos Baraúna e aprofundamento do MSBUSL.

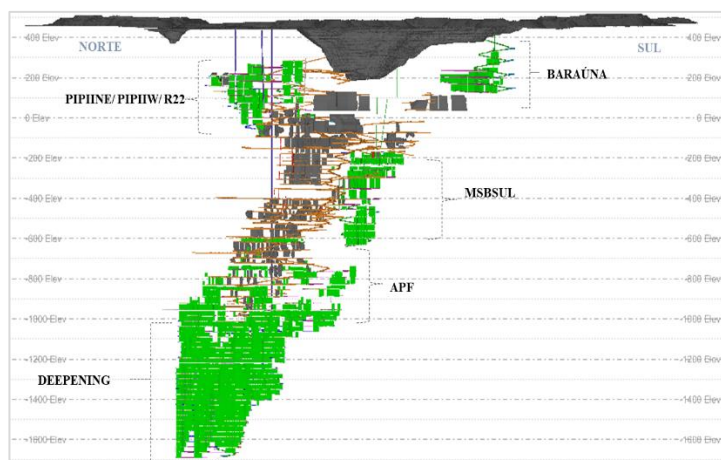


Figura 1: Mineração Caraíba e as diversas áreas de produção (sólidos em verde)

A Mineração Caraíba dispõe de uma malha de sondagem de conversão de reserva do indicado para medido com um afastamento de 22.5m entre as seções verticais como padrão exploratório voltado para investigação da mineralização. As seções têm direções leste/oeste e inclinações variadas em forma de leque,

localizadas com intuito de serem perpendiculares aos corpos de minério norte/sul (Freitas, 2016). Para a etapa de detalhamento dos realces que serão lavrados ao longo de dois anos, visando gerar confiabilidade na produção em um escala mensal, a malha se reduz para 11.25m a 12.50m (afastamento entre as seções e espaçamento entre os furos).

Para a descrição geotécnica foi adotado o método RMR de classificação do maciço rochoso, conforme metodologia prévia de 2015, porém na atualização do modelo estrutural, entre os anos de 2019 a 2021, foi realizada uma análise da correlação litológica via fotografia de furos para otimizar o tempo designado ao detalhamento da zona de falha, caracterizando os intervalos de interesse da estrutura.

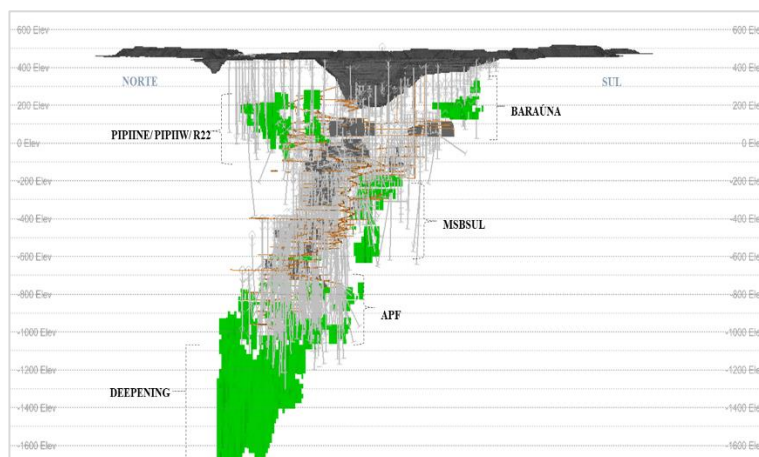


Figura 2: Disposição da malha de furos descritos geotecnicaamente ao longo das campanhas de 2015 a 2019.

O método RMR desenvolvido por Bieniawski (1989) busca classificar o maciço rochoso de acordo com os seguintes parâmetros:

- Resistência uniaxial da rocha intacta, que pode ser obtido a partir de testes de resistência a compressão uniaxial (I. S. R. M., 1981) ou realizando ensaios de Índice de Carga Pontual (Hoek & Brown, 1980);
- Índice de qualidade da rocha (RQD), desenvolvido por Deere (1968), que visa quantificar o grau de fraturamento do maciço nos testemunhos de sondagem rotativas.
- Espaçamento das discontinuidades, que é quantificado através do conceito do número de fraturas por metro descrito;
- Condições das discontinuidades, que indicam a abertura, persistência, rugosidade, preenchimento e condição da parede das discontinuidades existentes;
- Presença de água no subsolo indica possíveis alterações nas condições das superfícies das discontinuidades com o tempo, sendo responsável pela redução da resistência ao cisalhamento.

Foram avaliadas 76 seções geológico-geotécnicas ao longo de 1.7km no sentido norte-sul, correspondendo a 612 furos com dados geotécnicos de RMR, o que representa 130.391m lineares de caracterização geotécnica. Um banco de dados com todas as informações coletadas é administrado pelo setor de Geotecnia. Além disso, via extrapolação de dados, a partir da análise de fotografias dos furos, foram observadas oportunidades de gerar interpretações delimitando a zona de falha para a composição do sólido final representativo da estrutura, a partir da correlação litológica com a litologia metassomatito e, em alguns casos, serpentinito.

Em cada seção são criadas *strings* no sentido leste oeste no Datamine, baseando-se nos resultados de avaliação do RMR, observações de fotografias e avaliação litológica, tendo por seguinte a manipulação e ajustes no *software* para uma *linkagem*, reproduzindo os sólidos (*wireframes*) da zona de falha.

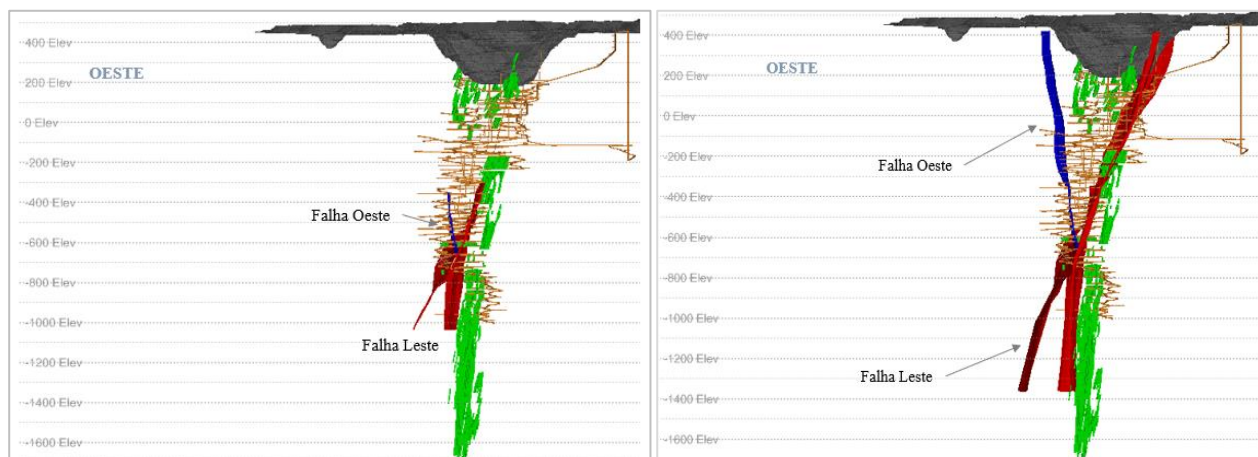


Figura 3: Comparativo entre o modelo estrutural de 2015 (à esquerda) e o modelo atualizado entre 2019 e 2021 (à direita).

4 Resultados e Discussões

A partir da definição dos sólidos das falhas, pode-se constatar algumas características importantes que vem sendo observadas desde a construção do modelo em 2015, porém com a contribuição de dados relevantes para a interpretação atual:

- Falha Leste: é considerada a zona de falha principal da mina subterrânea, com maciço rochoso tipo III a IV (RMR 21-60), tendo ocorrências de grandes fraturamentos, interceptando a mineralização leste até a cota -650 e galerias de desenvolvimento entre as cotas -100 a -707, onde a partir daí, posiciona-se no *hanging wall* do minério para o aprofundamento. A direção da falha leste é norte/sul com um mergulho de 65 graus para oeste até a cota -732, onde a partir de então observa-se a verticalização de uma estrutura mais próximo ao corpo de minério, tendo como principal litotipo o metassomatito e algumas observações de piroxenito, calcossilicáticas e serpentinito.

Quanto mais próximo à superfície, nota-se um grau de alteração mais elevado das discontinuidades e, quando na região abaixo da cota -732, nota-se que a estrutura vertical paralela à mineralização apresenta grau de fraturamento médio e RMR entre 40-60. A estrutura bifurcada à oeste apresenta um grau de fraturamento maior, porém esta se distancia do projeto da mina em 280m na região mais profunda da estrutura modelada. A espessura da falha ficou delimitada entre 8 a 30m, ganhando potência à medida que se aproxima da superfície. Sua extensão compreende desde a cota +405 até -1249 de acordo com o modelo atual, com menor espessura no projeto MSBSUL à medida que avança para sul, tendo relação com a mineralização no projeto MSBSUL entre a cota -162 a -456 e interceptando o futuro projeto da rampa de acesso à Baraúna. No aprofundamento da mina, abaixo da cota -1020, a falha principal leste paralela à mineralização dista de 60 a 80 metros do corpo de minério, apresentando associação com eventos sísmicos de alta magnitude durante a atividade de lavra dos realces paralelos à mesma.

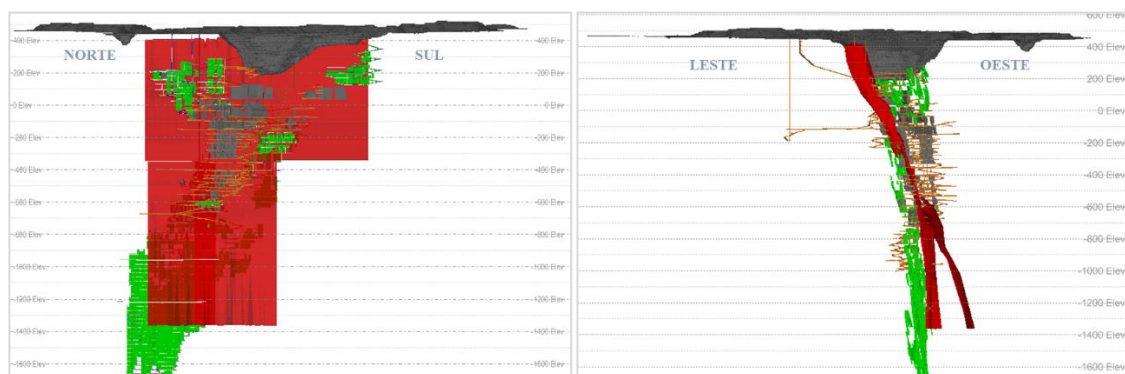


Figura 4: Representação da Falha Leste em seção norte-sul e leste-oeste.



Figura 5: Representação da Falha Leste: à esquerda, na região próxima à superfície cota +320 (FC5304), ao centro representa a falha vertical paralela à mineralização no aprofundamento na cota - 953 (FC40134) e à direita a falha bifurcada na cota -1060 (FC42253) indicando maior grau de fraturamento.

- Falha Oeste: 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, chamado pelos geotécnicos mais experientes da Mineração Caraíba, como a Falha Oeste da mina subterrânea (Freitas, 2016). Sua espessura varia de 10 – 13m, sendo sua cota inicial observada desde as interpretações no nível +420, chegando até a -668, tendo uma direção norte/sul e um mergulho de 70 a 80 graus para leste. A falha Oeste intercepta a rampa principal da mina nas cotas -300 e -490, onde se tem a aplicação de cambotas como sistema de suporte requerido em virtude da vida útil da escavação e da qualidade do maciço. Os litotipos predominantes são os piroxenitos e metassomatitos. A ocorrência de eventos sísmicos de alta magnitude associadas à movimentação dessa falha tem sido comprovada quando realizada a lavra dos realces do projeto PIIW, que distam cerca de 80-100m desse projeto para oeste.



Figura 6: Representação da Falha Oeste em seção norte-sul e leste-oeste.



Figura 7: Representação da falha oeste à esquerda na cota -36 (FC38163) e à direita na cota -646 (FC44145).



A interpretação das falhas oeste e leste possibilitaram auxiliar no *design* de mina, no contexto de curto e longo prazo. Para a região do projeto MSBSUL, a falha intercepta o desenvolvimento de galerias de minério e interseções com as travessas, portanto foi recomendado que seções horizontais da falha fossem desenhadas nos mapas bidimensionais que são utilizados no acompanhamento das galerias, visando apresentar às equipes operacionais, geotecnia e de planejamento de mina uma previsibilidade da informação, para que a taxa de avanço de desenvolvimento seja melhor sequenciada e a aplicação do suporte seja redefinida, de acordo com a caracterização do maciço rochoso para esse domínio geotécnico. O mapeamento geotécnico é então priorizado ao se aproximar da região especificada no modelo, objetivando melhorar a estimativa da influência da zona de falha. As recomendações de suporte são também inseridas nos mapas bidimensionais, facilitando assim a compreensão das orientações geotécnicas para a equipe operacional.

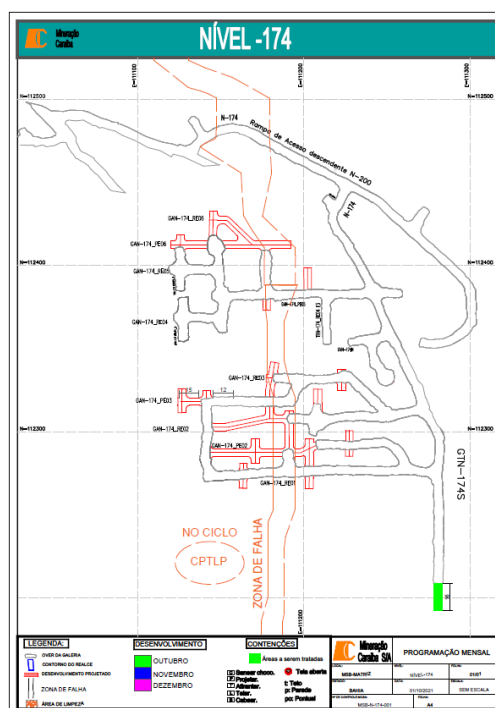


Figura 8: Representação do mapa 2D utilizado na composição do *book* trimestral demonstrando a zona de falha e a indicação de suporte requerido.

Ainda no projeto MSBSUL, foi realizada uma análise de quais seriam os realces planejados inseridos na região da falha. O principal intuito era o de gerar uma previsão da sequência de lavra de maneira a garantir maior segurança operacional na lavra e mitigar os riscos geotécnicos da região. Na zona de falha, as experiências prévias demonstram que a lavra dos realces deve ocorrer numa taxa de produção elevada e o ciclo de enchimento precisa reduzir ao máximo o tempo de exposição do vão aberto no pós lavra, caso contrário, a evolução das paredes dos realces pode ocasionar a perda de reservas futuras e colapsos de galerias. Essas informações são relevantes para a equipe de planejamento sequenciar os realces e suas respectivas taxas de produção e direcionar o sistema de enchimento *pastefill* de forma prioritária à região no plano de produção.

Tabela 1. Realces planejados em zona de falha no projeto MSBSUL

Nº Stopes	Painel	Projeto	Ano	Massa (t)
4	6	MSBSUL	2021/2022	102373
3	5	MSBSUL	2023	77555
18	4	MSBSUL	2024 a 2030	319152
29	3	MSBSUL	2021 a 2035	458306
Total				957386



Após a definição do comportamento da Falha Leste em 2020 e 2021, foi possível melhor orientar o *design* do projeto das rampas Baraúna e MSBUL, previstos para iniciar no ano de 2022, onde o desenho prévio tinha a rampa planejada em posição que, após a interpretação da zona de falha, observou-se que ambas estariam alocada em sua maior parte no interior da falha, o que ocasionaria a necessidade de suportes mais robustos e ciclos de desenvolvimento menores, aumentando o custo operacional de desenvolvimento da escavação e impactando o retorno financeiro no sequenciamento previsto para o plano de produção. Portanto, foi recomendado que os projetos da rampa fossem alocados em posição oposta à falha, há 50 metros de distância do corpo de minério.

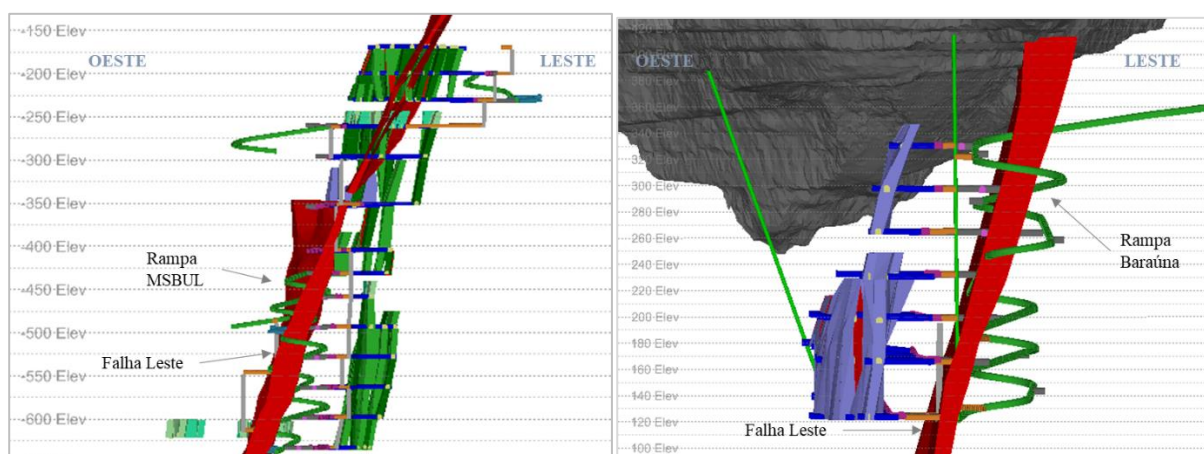


Figura 9: Posicionamento das rampas dos projetos MSBSUL e Baraúna no Q3 - 2020. A atualização da falha principal leste possibilitou a alteração do posicionamento da rampa.

A interpretação das falhas também vem sendo utilizada para auxiliar no projeto de alocação de *raises*, furos de infraestrutura, galeria de pesquisa, assim como um dos principais projetos para o futuro da mina – o *shaft* – cuja escavação de 1500m de profundidade deve finalizar no ano de 2025 e que será o principal meio de transporte de pessoas, minério e estéril abaixo da cota -1001. Compreende-se que o modelo estrutural tem representado um grande valor na mitigação de riscos geotécnicos para projetos de curto e longo prazo, assim como na otimização de custos operacionais para a mina, contribuindo com a rotina das áreas de planejamento, geotecnia, projetos e operação.

5 Considerações Finais

A construção do modelo estrutural de uma mina subterrânea representa um importante passo na avaliação de riscos geotécnicos e pode desempenhar um papel impactante na alocação de recursos para projetos de engenharia de uma mina. O estudo apresentado mostra que a previsibilidade geotécnica é capaz de direcionar as equipes de diferentes áreas a tomadas de decisões estratégicas ao negócio, possibilitando maior chance de retorno financeiro aliando-se à segurança operacional das atividades através da mitigação dos riscos geotécnicos identificados. A oportunidade de desenvolver modelos dinâmicos através de ferramentas mais modernas possibilitam que o tempo de resposta às análises seja reduzido e a interpretação otimizada. O mapeamento geotécnico precisa andar em conjunto com a construção do modelo geotécnico visando melhorar a compreensão da zona de falha.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Mineração Caraíba pelos dados fornecidos para a composição desse estudo e por contribuir com a oportunidade de desenvolvimento de temas técnicos de valor significativo para o setor de Geotecnia. Agradecemos também à Gerência de Planejamento de Mina, que vem prestando todo apoio e incentivo à integração das áreas de geotecnia e planejamento de mina.

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
 IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
 IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
 23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
 23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
 COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bieniawski, Z.T. (1989) - Engineering Rock Mass Classifications. John Wiley & Sons publ., New York, USA. 251p.
- Bye, A.R. 2006. The strategic and tactical value of a 3D geotechnical model for mining optimization, Anglo Platinum, Sandsloot open pit. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy, The South African Institute of Mining and Metallurgy*, vol 106.
- Deere, D. U. (1968). *Rock Mechanics in Engineering Practice. Geological considerations.* (eds. Stagg and Zienkiewicz), London: John Wiley and Sons, pp. 1-20.
- FREITAS, J.P. *Elaboração do Modelo Geomecânico Tridimensional para a reavaliação e setorização geotécnica dos realces da Mineração Caraíba*, 2016. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. Ouro Preto.
- Geologia de Longo Prazo da Mineração Caraíba (2013). *Relatório Técnico. Projeto Mina Subterrânea. Relatório Interno: Mineração Caraíba S/A*, 85p.
- Hanson, C. Thomas, D. and Gallagher, B. 2005. *The Value of Early Geotechnical Assessment in Mine Planning*, in Aziz, N (ed), Coal 2005: Coal Operators' Conference, University of Wollongong and the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, pp. 17-30.
- Hoek, E. & Brown, E. T., (1980). *Underground Excavations in Rock. In: Institution of Mining and Metallurgy.* London, UK, 527p.
- ISRM. (1981). *Rock Characterization Testing and Monitoring-ISRM Suggested Methods.* E.T. Brown (ed), Pergamon, Oxford, England, 211p.