

CLASSIFICAÇÃO DE SISTEMA Q APLICADO A MAPEAMENTO DE DOMÍNIO GEOTÉCNICO-ESTRUTURAL

SYSTEM-Q CLASSIFICATION APPLIED IN GEOTECHNICAL-STRUCTURAL MAPPING

JOÃO EDUARDO FOCHI RAMIRES

Geólogo Geotécnico Líder de Mapeamento, AngloGold Ashanti – MSG, Crixás, Brasil, joao.fochi@gmail.com

GUSTAVO ANTONIO PEREIRA BATISTA

Engenheiro Geotécnico, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Perth, Australia, gapbatista@gmail.com

JAIRO HENRIQUE DA SILVA

Gerente de Geotecnia, AngloGold Ashanti – MSG, Crixás, Brasil, jh.ufop@yahoo.com.br

MARCELO PEREIRA CAMPOS

Gerente Sr. de Geologia, AngloGold Ashanti – MSG, Crixás, Brasil, MPCampos@AngloGoldAshanti.com.br

JOE SEERY

Diretor, Bastion Geotechnical Pty Ltd, Perth, Australia, j.seery@bastiongeotech.com.au

RESUMO ABSTRACT

De acordo com as melhorias adquiridas nos estudos de galerias subterrâneas ao longo do tempo, foram criados vários sistemas de classificação de maciços rochosos e técnicas de mapeamento que estão cada dia mais disseminadas em atividades mineras ao redor do mundo. Essas diferentes técnicas podem ser apropriadas, ou não, para cada caso de maciço em questão e é uma responsabilidade do profissional geólogo, geotécnico ou engenheiro, definir qual é a mais apropriada à realidade do maciço rochoso e que melhor o represente como um todo. Este trabalho tem o intuito de apresentar a integração dos dados coletados por três técnicas diferentes de mapeamento geomecânico (mapeamento de janelas, mapeamento linear e mapeamento de estruturas persistentes) e suas correlações em conjunto com o método de projeção de estruturas regionais, inferindo grandes estruturas e, conseqüentemente, facilitando as recomendações de sistema de suporte a serem realizadas.

Palavras-chave: Sistema-Q, Mapeamento de Domínio Geotécnico-Estrutural, GEM4D, Vizinho Mais Próximo, Sistema de Suporte.

According to the improvements acquired in underground galleries studies along time, several rockmass classification systems followed by mapping techniques have been created and are each day more spread in mining activities around the world. These different mapping technics can be appropriate or not to each rockmass in case and it is a responsibility from the geologist, geotechnician or engineer to define which one has the best adherence to the rockmass reality and better representing it as a whole. This work aims to show the integration of the data gathered in three geomechanical mapping techniques (window mapping, linear mapping and large structures mapping) and their correlations, plus the application of the regional structure projections method, for inferring the major structures and consequently bring more clarity to the ground support systems specifications to be done.

Keywords: Q-System, Geotechnical-structural Domain Mapping, GEM4D, Nearest Neighbor, Support System.

1 INTRODUÇÃO

O complexo de minas de ouro da Mineração Serra Grande (MSG) operadas pelo grupo AngloGold Ashanti, no Brasil central, é formado por várias operações subterrâneas profundas e rasas e minas a céu aberto. As operações subterrâneas da mina Ingá ocorrem há mais de 3 anos, com suas escavações próximas a 800 m de profundidade e seus corpos de minério sendo lavrados pelo método *Sub-Level Open Stopping*, Batista & Campos (2015).

As instalações da MSG estão localizadas próximas a cidade de Crixás, no estado de Goiás, Brasil. A cidade está a 321 km ao norte de Goiânia, a capital do estado e a 387 km a noroeste da capital do país, Brasília. O município pode ser acessado pela rodovia BR-153 a partir de Goiânia e GO-435 a partir de Brasília. A mina está localizada a 6 km a sudeste do centro de Crixás e pode ser acessada pela estrada de terra GO-336 (Fig. 1).

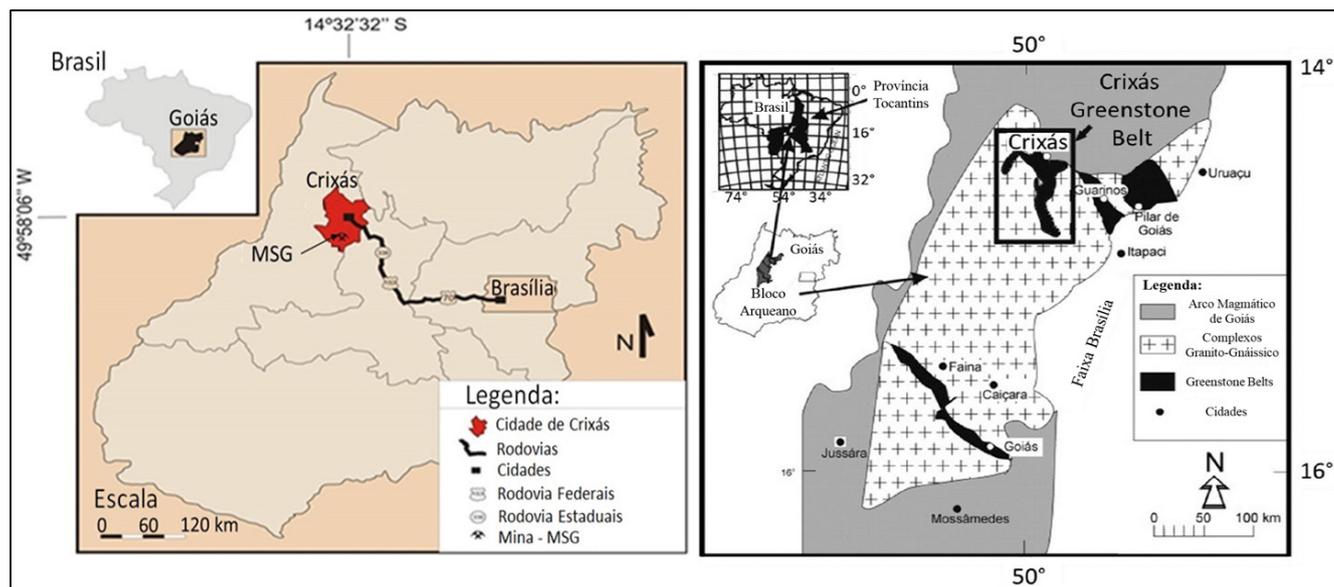


Figura 1. À esquerda, a localização geográfica do estado de Goiás, da cidade de Crixás e da Mineração Serra Grande (MSG), modificado de Ramires et al., 2019. À direita, a localização geológica da Província Tocantins, da Faixa Brasília, do Bloco Arqueano de Goiás e do Greenstone Belt Crixás, modificado de Jost et al., 2010.

O maciço da mina Ingá é composto por camadas deformadas de antigas rochas sedimentares e vulcânicas da sequência estratigráfica do Greenstone Belt de Crixás, como mencionado por Castoldi (2015), exibindo terrenos geológicos complexos que foram dobrados várias vezes, intensamente cisalhados e fraturados ao longo de sua história geológica. O Sistema Q do Instituto Norueguês de Geotecnia (2015) aplicado ao mapeamento geotécnico-estrutural de domínios tem se mostrado fundamental no entendimento e gerenciamento do comportamento do maciço rochoso ao longo do desenvolvimento da mina.

O Greenstone Belt de Crixás apresenta maciços rochosos que estão associados a dois prin-

cipais eventos deformacionais regionais no Paleoproterozóico e Neoproterozóico, por meio das orogênicas dos eventos Transamazônico e Transbrasiliano (Jost et al. 2014), estruturas que são refletidas nas minas de forma persistente. Os veios mineralizados desenvolveram um comportamento parasítico, visto que estes são compostos por pequenos veios de quartzo em diversas escalas de tamanho dentro da camada principal o que, de um ponto de vista geotécnico, tem grande impacto. Esta ocorrência natural transformou a zona de minério em uma camada mais resistente e com um caráter mais rúptil do que a rocha encaixante primária. O diferente comportamento reológico entre a camada plastificada de xisto carbonoso

que carrega os veios de minério em relação à sua matriz regular, composta puramente pelo xisto carbonoso, desenvolveu as condições estruturais necessárias para o evento de cisalhamento ocorrer nos contatos de topo e na base da camada.

É importante ressaltar que este trabalho foi publicado em inglês no 14th ISRM realizado em Foz do Iguaçu no Brasil em 2019 e que, devido a sua relevância as atividades mineras subterrâneas no Brasil, se vê importante a publicação de sua versão em português para comunidade brasileira de geotecnia mineira.

2 JUSTIFICATIVA

Os terrenos auríferos da MSG são compostos por diferentes tipos de modelos de mineralização o que reflete em diversos estilos de desenvolvimento subterrâneo e métodos de lavra que vem sendo aplicados por muitos anos pela empresa. Conseqüentemente, o nível de complexidade dos maciços rochosos que hospedam os corpos de minério é alto. Para tanto, um método de mapeamento apropriado para entender o comportamento das escavações, tanto na lavra quanto no desenvolvimento, é fundamental. Como também na estabilidade de pilares e nas recomendações dos sistemas de suporte mais adequados para cada tipo de galeria e de acordo com a sua qualidade de maciço. Sempre presando por um ambiente de trabalho seguro para o time operacional que acessa as minas subterrâneas todos os dias e lembrando que a mineração é uma das atividades geotécnicas de maior risco (Groves et al. 2007). A integração em mapa dos valores do índice de Q com as macroestruturas que definem o maciço rochoso e suas projeções, em um modelo geotécnico-estrutural tridimensional, é uma excelente ferramenta para prever o comportamento do maciço, ao longo do desenvolvimento e se tornou parte do código de práticas geotécnicas da MSG.

3 MÉTODO

O método de construção do mapa de classificação do sistema Q, integrado com os dados estruturais, consiste em quatro técnicas distintas: mapeamento de janelas, mapeamento linear,

mapeamento de estruturas persistentes e projeção tridimensional de estruturas regionais (Fig. 2). A técnica de mapeamento de janelas consiste na identificação e diferenciação de domínios geotécnicos pela intensidade de fraturamento e suas características, escolhendo o melhor afloramento para a realização da janela de classificação, por meio da fórmula de Q, proposta pelo Instituto Norueguês de Geotecnia (2015), como demonstrado na Equação 1. Sempre buscando a melhor representação de cada subdomínio como um todo, dentro da janela escolhida, os parâmetros de Q (RQD, Jn, Jr, Ja, Jw e SRF), são coletados junto com as orientações de mergulho e azimute de cada família de estruturas.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (1)$$

RQD = índice de designação da qualidade da rocha; Jn = número de famílias de juntas; Jr = rugosidade da junta; Ja = número de alteração da junta; Jw = fator de redução de água da junta; e SRF = fator de redução de estresse.

A técnica de mapeamento linear consiste em aplicar os valores do índice Q e as características estruturais, ambos coletados na janela escolhida, ao resto do domínio que estes representam e ao longo de uma mesma galeria com a mesma orientação. Em uma área onde a mesma estrutura ocorre no mesmo contexto litológico, com orientação estrutural similar e com um número regular de exposições, um domínio linear pode ser definido. A técnica de mapeamento de estruturas persistentes consiste em coletar as medidas e parâmetros de Jr, Ja e Jw das grandes discontinuidades que cruzam os dois lados da galeria, gerando condições potencialmente instáveis ao longo do desenvolvimento da mesma. A técnica de projeções de estruturas regionais é baseada na modelagem tridimensional dos planos das grandes estruturas. O processo é realizado com o software GEM4D, da BasRock, por meio da conexão dos planos de macroestruturas da mesma família e com orientação estrutural similar que ocorrem nas galerias adjacentes e subjacentes, controlando os limites das estruturas a partir de suas aparições em diferentes níveis da mina (Fig. 3).

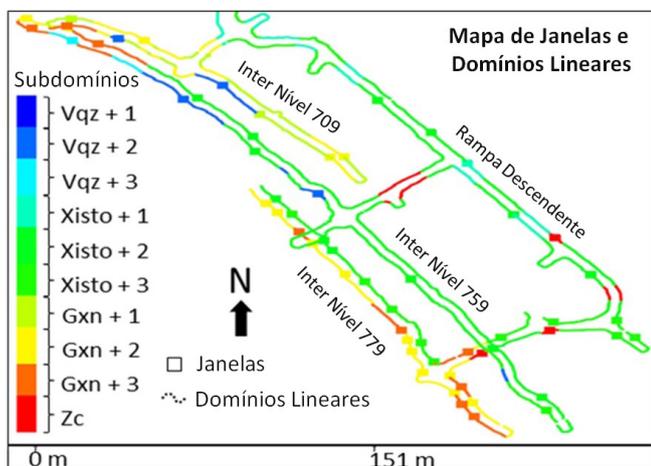


Figura 2. Mapa de janelas e domínios lineares.

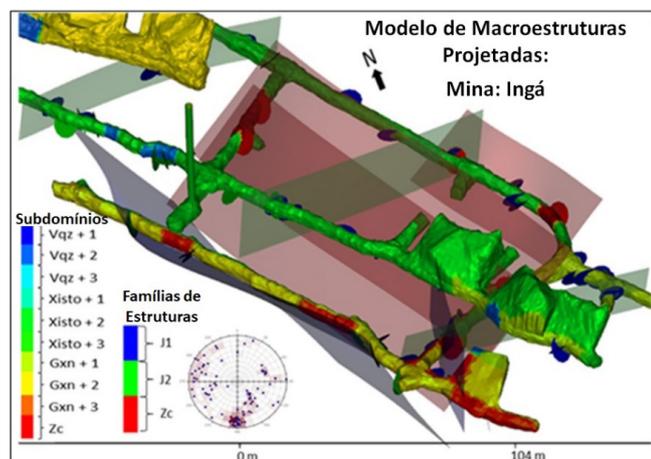


Figura 3. Modelo integrado de subdomínios e macroestruturas projetadas.

A integração das quatro técnicas listadas acima definem o método de domínio Q-Estrutural. O produto final é a rápida interação entre todos os dados usando o software GEM4D com o intuito

de gerar informação de alta qualidade, em tempo recorde, para a operação de curto prazo e, a partir de um modelo tridimensional preciso é possível construir um banco de dados denso e inteiramente coletado in situ.

Como consequência, o gerenciamento de risco é aprimorado, uma vez que os riscos de instabilidade são reduzidos devido as especificações apropriadas de sistema de suporte realizadas, fornecendo um ambiente seguro ao time operacional que trabalha no subterrâneo.

4 RESULTADOS

Quatro domínios geotécnicos-estruturais foram identificados: zonas de cisalhamento (Zc), xisto grafitoso (Gxn), xisto não grafitoso (Xisto) e veios de quartzo (Vqz). Cada um desses grupos, com exceção das zonas de cisalhamento, são sub classificados em três subdomínios (+ 1, + 2 e + 3), de acordo com o número de famílias de estruturas presentes dentro da janela de classificação.

O domínio + 1 representa uma janela onde apenas a foliação regional (Sn) é observada. O domínio + 2 representa uma janela onde a Sn e mais outra família de estrutura (junta ou zona de cisalhamento) são observadas. O domínio mais + 3 representa uma janela onde a Sn e mais duas outras famílias de estruturas (juntas ou zonas de cisalhamento) são observadas. Baseado nas observações até o momento, a Tabela 1 demonstra os domínios e as características de seus subdomínios. Em todos os subdomínios, estruturas aleatórias são consideradas de acordo com a classificação do Jn.

Tabela 1. Litologias, intervalos de resultados de Q e classes rochosas dos subdomínios.

Subdomínio*	Litologia	Intervalos de Q	Classes de Rocha
Zc	Zonas de Cisalhamento	0,2 - 5,0	Muito pobre - pobre
Gxn + 3	Xisto grafitoso	0,7 - 16,7	Muito pobre - bom
Gxn + 2	Xisto grafitoso	13,8 - 32,5	Bom
Gxn + 1	Xisto grafitoso	25,9 - 56,7	Bom - muito bom
Xisto + 3	Xisto grafitoso	1,6 - 18,9	Pobre - bom
Xisto + 2	Xisto grafitoso	5,1 - 28,3	Justo - bom
Xisto + 1	Xisto grafitoso	28,3 - 66,7	Bom - muito bom
Vqz + 3	Veios de Quartzo	2,7 - 14,6	Pobre - bom
Vqz + 2	Veios de Quartzo	12,3 - 20,6	Bom
Vqz + 1	Veios de Quartzo	25,0 - 50,0	Bom - muito bom

*As zonas de cisalhamento representam os domínios mais problemáticos de um ponto de vista de estabilidade, mas é importante ressaltar que todos os subdomínios + 3 podem ser tão problemáticos quanto elas ao longo do desenvolvimento, assim como também durante a lavra.

4.1 Classificação de Domínios

Os domínios de Gxn e Xisto demonstram classes de rochas de muito pobres a muito boas e são considerados os domínios mais predominantes do maciço. Eles apresentam comportamentos geotécnicos similares pelo fato de suas gêneses litológicas ocorrerem associadas. Na maior parte das vezes eles tendem a aflorar como uma mistura dos dois, com um prevalecendo ao outro de forma

localizada. A razão para sua grande exposição é o fato de que, em seus contatos, são hospedados os veios de quartzo com ouro e os desenvolvimentos secundários (galerias de minério) são realizadas ao longo deste contato. De qualquer forma, ao avaliar a predominância entre os dois, o Xisto é preponderante, pois o desenvolvimento primário (rampas, nichos, travessas e etc.) feito para acessar as zonas de minério, é realizado no *footwall*, onde ocorre a sua maior exposição.

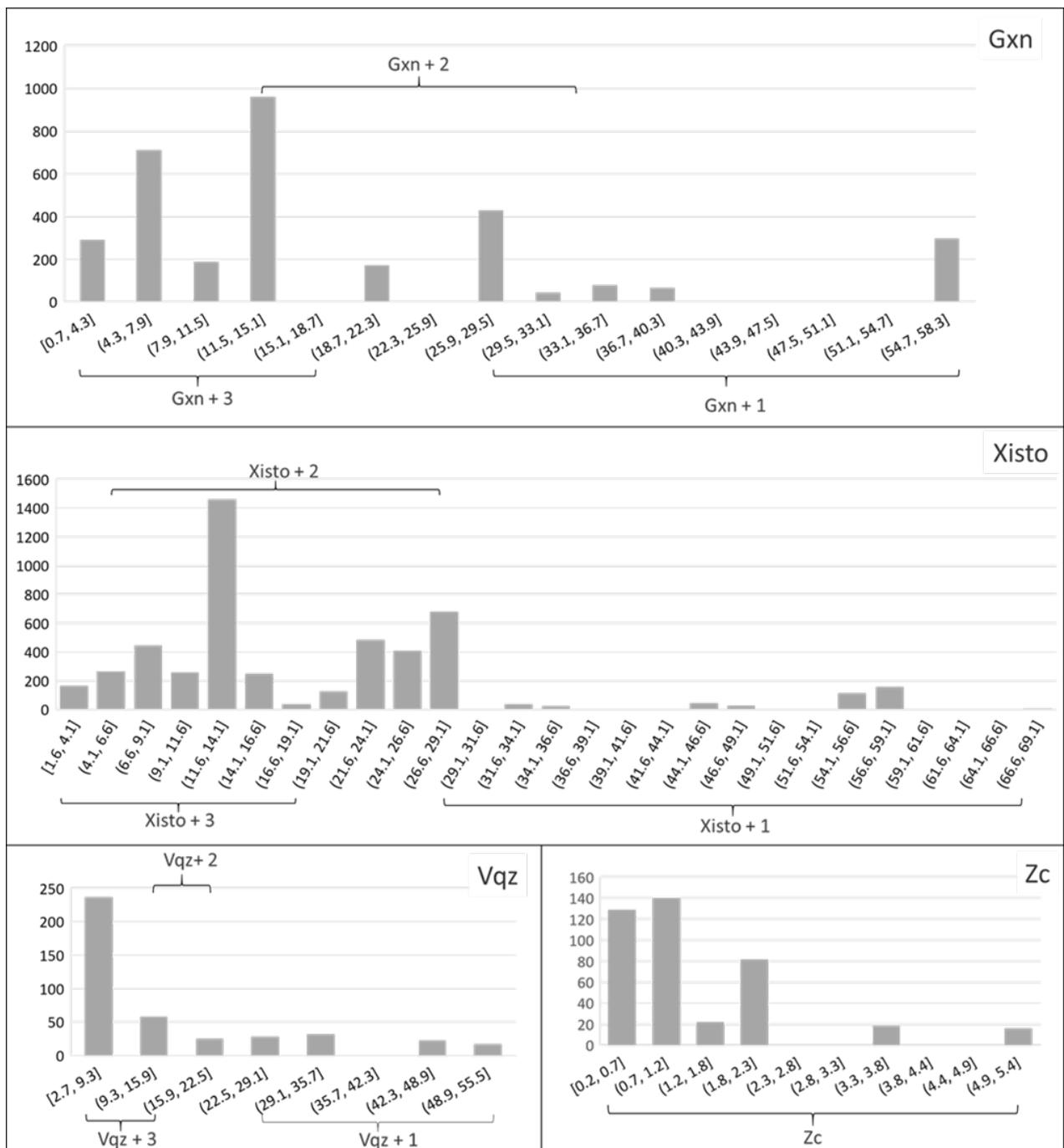


Figura 4. Histograma demonstrando os resultados de Q por subdomínio classificado.

Devem ser ressaltadas as diferenças entre mapear o desenvolvimento primário e secundário, uma vez que, no secundário, os veios da zona de minério serão lavrados e o foco do mapeamento é caracterizar o *hangingwall* e o *footwall*¹. Já no primário, o foco é caracterizar toda a seção da galeria, cobrindo as paredes e teto. Portanto, os veios são mapeados quando sua espessura é superior ao teto da galeria. Neste cenário, o veio contempla todo o *hangingwall* e explica a baixa densidade de dados de Vqz. É observado que o Vqz demonstra classes de rochas de pobres a muito boas (Fig. 4).

A Zc apresenta classes de rocha de muito pobres até pobres e tende a ser discreta em escala de galeria, porém é persistente em escala de mina quando olhando para o maciço como um todo. Os domínios de Vqz e Zc, juntos com os demais subdomínios + 3, são os principais focos do mapeamento, pois representam as piores condições de terreno a ser interceptado nos maciços do Greens-tone Belt de Crixás. Constantemente, estes são interceptados em rampas, travessas e dentro do veio de minério no *hangingwall* e *footwall*, devido a sua gênese ser temporalmente relacionada ao evento de mineração dos veios auríferos. A Figura 4 demonstra um histograma com as observações de subdomínios.

Considerando a ausência de água subterrânea no maciço onde a mina Ingá encontra-se geologicamente localizada, sua relação com o fator de redução de estresse (SRF) se torna uma constante, devido ao fato de que a área de mapeamento em questão tem uma pequena diferença de elevação e, conseqüentemente, os efeitos de estresses diferenciais dentro desta porção da mina são insignificantes. Do ponto de vista de estabilidade, é compreensível que, quando analisando os baixos resultados da relação Jr/Ja da fórmula do Q, os valores mais baixos de Q de um subdomínio + 1 podem ser tão problemático quanto os mais altos de um + 2. O que também é aplicável para a relação entre os resultados mais baixos de Q de um + 2, e os mais altos de um + 3.

Em todos os domínios, o espaçamento, tanto da foliação quanto das famílias de juntas, é na ordem de centímetros e interação de forma pareci-

da, sendo que o RQD de Palmstrom (2005), que é derivado da estimativa do espaçamento, torna-se o parâmetro mais sensível na caracterização do maciço rochoso.

Assumindo que os resultados da relação Jr/Ja são constantemente 1,5, sendo que as fraturas dos domínios de Vqz expressam alta rugosidade e preenchimento duro por quartzo, fica claro que a equação tende a ser mais controlada pela relação RQD/Jn. Mesmo em um subdomínio + 1, a intensidade do faturamento é alta e leva a diminuição da relação RQD/Jn, e conseqüentemente, diminui o resultado da divisão dos dois.

O domínio da Zc não é subdividido devido aos baixos resultados de Q e os parâmetros de RQD, Jr e Ja terem os valores mais baixos entre todas as estruturas. Eles representam condições de instabilidade de terreno, sendo os principais responsáveis por grande parte das rupturas em galerias. O que gera a necessidade da aplicação de suporte de superfície em todas as exposições desta estrutura, assim como também nos subdomínios + 2 e + 3, dependendo de sua exposição e o tipo de desenvolvimento subterrâneo.

4.2 Caracterização Estrutural

Como demonstrado nos resultados da tabela 2 e no estereograma da Figura 5, quatro famílias de estruturas foram identificadas: uma foliação regional (Sn), a qual também representa os contatos litológicos, duas famílias de juntas separadas em quatro direções principais (J1e, J1w, J2n e J2s), e a família das zonas de cisalhamento (Zc). Isto representa a caracterização estrutural do maciço em escala de mina e a classificação de domínios previamente descrita em escala de galeria e pode conter subconjuntos da classificação global.

1 O *hangingwall* representa o maciço rochoso acima da mineralização (capa) e o *footwall* o abaixo (lapa).

Tabela 2. Parâmetros de Q e estruturais das famílias de estruturas.

Estrutura*	Família	Dip/DipDir	Jr	Ja	Jw	N° Observações
Foliação	Sn	36°/236°	1,5	1	1	152
Zonas de Cisalham.	Zc	55°/229°	0,5	1	1	16
Junta	J1e	78°/088°	2	2	1	54
Junta	J1w	71°/268°	2	1	1	25
Junta	J2n	73°/357°	2	1	1	125
Junta	J2s	76°/190°	2	2	1	15

*A Sn e Zc, são subparalelas em azimuth, porém não no mergulho, visto que a Zc é mais inclinada. Assumindo que o evento de cisalhamento ocorreu ao longo do mergulho da Sn, e elas apresentarem o Jr mais baixo dentre todas as estruturas, é possível entender o seu controle estrutural.

Denotando a importância do ponto de vista geotécnico, a combinação entre essas estruturas e a orientação das galerias pode proporcionar condições de instabilidade, aumentando a incidência de queda de blocos se o sistema de suporte correto não for aplicado.

Duas famílias de juntas foram identificadas: J1 e J2, sendo as mesmas subclassificadas como J1e (78°/088°), e J1w (71°/268°), pois representam um par conjugado subparalelo com mergulho variando de leste para oeste. J2n (73°/357°) e J2s (76°/190°) também são um par conjugado subparalelo, com seu mergulho variando de sul para norte.

J1w e J2n apresentam predominantemente parâmetros Jr e Ja com valores de 2 e 1, respectivamente, visto que nenhum preenchimento é observado nas paredes das fraturas e ambos apresentam um Jr ligeiramente rugoso devido a sua matriz rochosa irregular.

J1e e J2s apresentam predominantemente parâmetros Jr e Ja ambos iguais a 2, sendo que eles apresentam preenchimentos não alterados de quartzo e carbonatos nas paredes das fraturas. Todas essas descontinuidades apresentam Jw de 1 visto que não é observado influência de água nas descontinuidades.

A foliação regional Sn apresenta orientação preferencial 31°/248°, apresenta-se crenulada ao longo do de seu azimuth, porém, com marcas de lineação tipo *slickenside*, ao longo do mergulho. Demonstra resultados predominantes para Jr e Ja de 1,5 e 1, respectivamente, devido a superfície de suas descontinuidades serem moderadamente rugosas e sem preenchimento.

As zonas de cisalhamento apresentam orientação preferencial 42°/239°, apresenta-se crenulada

ao longo do azimuth, porém, com marcas de lineação tipo *slickenside*, ao longo do mergulho. Expressa resultados predominantes para Jr e Ja de 0.5 (com aspecto espelhado) e 1, respectivamente, com uma superfície suave e sem preenchimento.

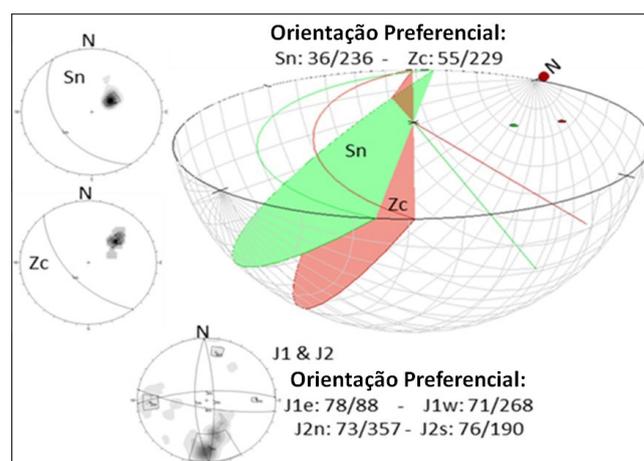


Figura 5. Estereogramas demonstrando o controle estrutural do maciço rochoso da mina Ingá.

4.3 Integração de Dados

O produto final é a rápida integração dos dados processados a partir das três técnicas de mapeamento e a projeção tridimensional das macroestruturas. Aplicando as ferramentas de interpolação do software GEM4D pelo método do Vizinho Mais Próximo de Isaaks & Srivastava (1989), é possível plotar os valores do índice Q no design tridimensional das escavações e visualiza-los junto com as macroestruturas (Fig. 6).

É notável que o simples fato de visualizar os valores de Q integrados com as escavações e as estruturas que definem o controle estrutural

da área, favorece o gerenciamento antecipado de possíveis instabilidades, em prol de especificar o sistema de suporte mais adequado para cada domínio mapeado a longo da galeria. Junto à rápida integração de dados e após todo o processo pronto, tem-se a facilidade de analisar e resolver problemas a partir de um ponto de vista técnico preciso. Simplesmente entendendo como as estruturas estão geologicamente localizadas e orientadas permite entender seus impactos nos diversos tipos de desenvolvimento subterrâneo escavados pelas minas da MSG.

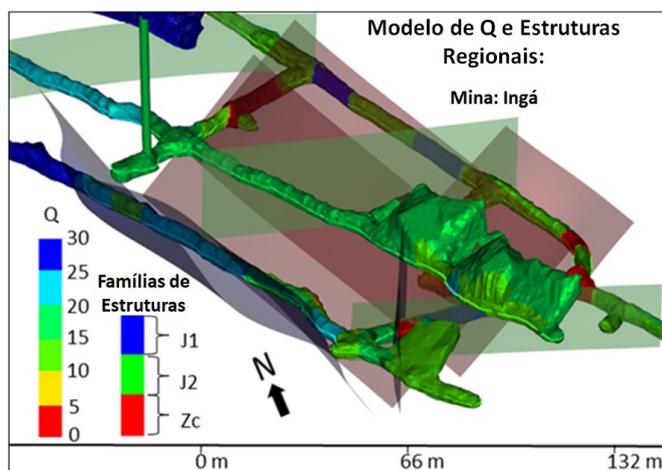


Figura 6. Resultados de Q interpolados no design subterrâneo integrados com as macroestruturas.

5 CONCLUSÕES

O método aplicado demonstrou boa aderência ao trabalho proposto e se tornou um procedimento na divisão de mecânica de rochas da Mineração Serra Grande correspondendo a uma das técnicas presente no Código de Práticas Geotécnicas da AngloGold Ashanti. O produto chave deste trabalho é a previsibilidade em gerenciar não apenas condições de instabilidades, mas também em otimizar a orientação do desenvolvimento subterrâneo de um ponto de vista estratégico, evitando os inúmeros problemas que eventuais condições ruins de terreno e macroestruturas com potencial de ruptura podem causar a galerias subterrâneas.

Por meio da plotagem dos valores de Q no ábaco de especificação de sistema de suporte do Instituto Norueguês de Geotecnia (2015), é possível definir a combinação de sistema de suporte mais apropriada para cada condição de

terreno exposta na área mapeada. Interpolando os resultados de Q, adquiridos pelas técnicas de mapeamento no design tridimensional das galerias subterrâneas, é possivelmente definir exatamente onde a combinação de sistema de suporte especificado pelo ábaco deve ser instalado na mina. Adicionalmente, entender o arranjo estrutural de um terreno altamente deformado e como o mesmo irá se comportar em relação ao sistema de suporte, é uma excelente tática.

A oportunidade de se aplicar a contenção específica e apropriada de acordo com a qualidade do maciço e as principais macroestruturas trouxe um novo cenário para as operações subterrâneas da MSG, contribuindo para atingir a excelência operacional de maneira segura e lucrativa.

AGRADECIMENTOS

O autor gostaria de agradecer a Mineração Serra Grande e a AngloGold Ashanti por permitir esta publicação e apoiar a iniciativa. Também, a todas as pessoas envolvidas neste artigo e os apoiadores: Diogo A. Costa, Kobus Du Plooy, Emrich Hamman, Lammie Nienaber, Gerhard Hofmann, Julian Venter, Gerson R. Rincon, Lucas Siqueira, Philippe Resende, a minha esposa Renata S. D. Borges e minha família.

REFERÊNCIAS

- Batista, G.A.P., Campos, M.P. (2015) Aplicações Geotécnicas para Redução da Diluição Operacional na Lavra Subterrânea: 4º Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas, São Paulo. CBT, 9 p.
- Castoldi, M.A.S. (2015) O Distrito Aurífero de Crixás - GO: Caracterização do Novo Corpo de Minério Ingá, trabalho de formatura, Departamento de Geologia / UFRGS.
- Groves W.A., Kecojevic, V.J., Komljenovic, D. (2007) *Analyses of fatalities and injuries involving mining equipment. Journal of Safety Research*, 38, p. 461-470.
- Isaaks, E.H., Srivastava R.M. (1989) *An Introduction to Applied Geostatistics*, Oxford University Press, New York, NY, USA, 561 p. 6.

- Jost, H., F.C. Junior, I.A. Dussin, C.C.G. Tassinari, R. Martins. 2010. *A U-Pb zircon Paleoproterozoic age for the metasedimentary host rocks and gold mineralization of the Crixás greenstone belt, Goiás, Central Brazil*. Ore Geol. Rev. Res. 37: 127 – 139.
- Jost, H., Carvalho M.J., Rodrigues V.G. & Martins R. 2014 *Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras, Greenstone Belts de Goiás*. CPRM, p. 141-166.
- Norwegian Geotechnical Institute (2015) *Using the Q-system for Rock Mass Classification and Support Design*, Handbook, NGI, Oslo, Norway, 54 p.
- Palmstrom, A. (2005) *Measurements of and Correlations between Block Size and Rock Quality Designation (RQD), Tunnelling and Underground Space Technology*, 20, p. 362-377.
- Ramires, JEF, Batista, GAP, Da Silva, JH, Campos, MP, Seery, JM (2019) *Q-system classification applied to geotechnical-structural domain mapping, Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure Development: proceedings of the 14th ISRM*, ed. Balkema, ISRM, Foz do Iguaçu, p. 520-527.